



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OBRÁBĚNÍ KALENÝCH OCELÍ

MACHINING OF HARDENED STEELS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Veselý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Ondřej Veselý**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a průmyslový management
Vedoucí práce: **Ing. Aleš Jaroš, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Obrábění kalených ocelí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce je zaměřena na podélné soustružení kalených ocelí používaných pro výrobu valivých elementů ložisek za použití nástrojů z PKNB.

Cíle diplomové práce:

1. Charakteristika technologie soustružení.
2. Charakteristika řezných materiálů.
3. Charakteristika tepelného zpracování oceli.
4. Experimentální část.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, M., PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 255 s. ISBN 80-214-2374-9.

PTÁČEK, L. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, c2003. ISBN 80-7204-283-1.

PÍŠKA, M. Speciální technologie obrábění. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. 247 s. ISBN 978-80-214-4025-8.

HUMÁR, A. Materiály pro řezné nástroje. 1. vyd. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce na téma Obrábění kalených ocelí je zaměřena na analýzu podélného soustružení kalené oceli 14 109 pomocí nástroje z PKNB z hlediska měření silového zatížení pomocí dynamometru a následného vyhodnocení jakosti povrchu. Teoretická část se zabývá problematikou technologie soustružení, řeznými materiály a tepelným zpracováním oceli. V praktické části byl během experimentu posouzen vliv řezných podmínek na výsledné hodnoty. Testovalo se dvanáct kusů vzorků s různými kombinacemi řezných podmínek, přičemž byl vybrán ten vzorek, který splňoval kritérium kombinace minimálních hodnot řezných sil a jakosti povrchu. Z experimentu je patrné, že vhodnou kombinací řezných podmínek lze dosáhnout až dvojnásobně nižších hodnot silového zatížení.

Klíčová slova

soustružení, silové zatížení, jakost povrchu, kubický nitrid boru, kalená ocel

ABSTRACT

Diploma thesis on Machining hardened steels is focused on the analysis of longitudinal turning of hardened steel 14 109 by using a tool from PKNB in terms of measuring the force load using a dynamometer and then evaluating the surface quality. The theoretical part deals with the issue of turning technology, cutting materials and heat treatment of steel. In the practical part, the influence of cutting conditions on the resulting values was assessed during the experiment. Twelve samples with different combinations of cutting conditions were tested, then was selected a sample that met the criterion of combining minimum cutting forces values and surface quality. The experiment shows that force load values can be achieved twice less by combining cutting conditions with an appropriate combination.

Key words

turning, force load, surface quality, cubic boron nitride, hardened steel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VESELÝ, Ondřej. *Obrábění kalených ocelí* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132917>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Aleš Jaroš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Obrábění kalených ocelí** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

19.5. 2021

Datum

Bc. Ondřej Veselý

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu Ing. Aleši Jarošovi, Ph.D. za věnovaný čas, cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Karlu Osičkovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při zajištění materiálového vybavení potřebného k realizaci experimentální části. Poděkování patří také panu Jiřímu Čechovi a panu Janu Pokornému za pomoc při realizaci experimentu v dílnách ÚST FSI VUT v Brně.

OBSAH

ABSTRAKT	4
PROHLÁŠENÍ	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH.....	7
ÚVOD.....	9
1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ	10
1.1 Nástroj	10
1.1.1 Geometrie soustružnického nože.....	11
1.2 Kinematika soustružení	12
1.3 Tepelné účinky obrábění	13
1.3.1 Teplotní pole obrobku	13
1.4 Výkon při soustružení.....	14
1.5 Řezné síly při soustružení.....	15
1.6 Kvantifikace a druhy třísek.....	17
1.7 Používané druhy nástrojů	18
1.7.1 Volba nástroje a vyměnitelné břitové destičky	18
1.8 Vybrané vlastnosti tvrdého obrábění.....	20
2 CHARAKTERISTIKA ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ	21
2.1 Rychlořezné oceli	22
2.2 Slinuté karbidy.....	22
2.2.1 Nepovlakované slinuté karbidy	23
2.2.2 Povlakované slinuté karbidy	24
2.3 Cermety	25
2.4 Řezná keramika	26
2.5 Kubický nitrid boru	27
2.6 Polykrystalický diamant	30
3 CHARAKTERISTIKA TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ OCELI.....	31
3.1 Žíhání.....	32
3.1.1 Žíhání bez překrystalizace.....	33
3.1.2 Žíhání s překrystalizací	33
3.2 Kalení	34
3.2.1 Způsoby kalení	36
3.3 Popouštění	37

4	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	38
4.1	Obráběný materiál.....	38
4.2	Obráběcí stroj.....	39
4.3	Použitý nástroj a VBD	41
4.4	Řezné podmínky experimentu	42
4.5	Použité měřicí zařízení a charakteristika měřených veličin.....	43
4.5.1	Měření řezných sil pomocí dynamometru Kistler	43
4.5.2	Posuzované parametry jakosti povrchu a použitý měřicí přístroj.....	44
4.6	Průběh měření silového zatížení	46
4.7	Grafické vyhodnocení silového zatížení	48
4.8	Průběh měření jakosti povrchu	57
4.9	Vyhodnocení měření jakosti povrchu	58
4.10	Stanovení přímých nákladů v závislosti na trvanlivosti břitu nástroje	63
	ZÁVĚR	65
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	70
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

ÚVOD

Problematika obrábění kalených materiálů je v dnešní době moderních výrobních technologií velmi diskutované téma. Za účelem racionalizace výrobních procesů je hledán optimální technologický postup výroby součástí vedoucí k dosažení mety pro splnění dílčích cílů konkrétního výrobního podniku a udržení si konkurenceschopnosti na trhu. Jedním z příkladů pro optimalizaci technologického procesu v oblasti obrábění kalených materiálů, tj. materiálů, které byly podrobeny tepelným zpracováním, je například možnost nahrazení dokončovací technologie broušení právě soustružením za pomoci vyměnitelné břitové destičky z PKNB, která svými vlastnostmi a použitím v mnoha případech splňuje kritéria z hlediska dodržení požadované jakosti povrchu. Z toho plyne důležitost volby řezného nástroje. Proces zavedení vhodného řezného nástroje do výroby má počátek v oblasti výzkumu a vývoje, kde je důležitá pro výrobce nástrojů zpětná vazba s ohledem na dosažené výsledky v oblastech silového zatížení, tepelných vlivů, procesních podmínek či míře opotřebení VBD pro daný kalený materiál. A právě analýza silového zatížení pro různé kombinace řezných podmínek s ohledem na výsledky kvality jakosti povrchu během podélného soustružení za použití nástroje z PKNB je hlavním cílem této diplomové práce, která se opírá o teoretickou část zaměřenou na základní principy a průvodní jevy soustružení, používané druhy řezných materiálů ve strojírenství a způsoby tepelného zpracování oceli.

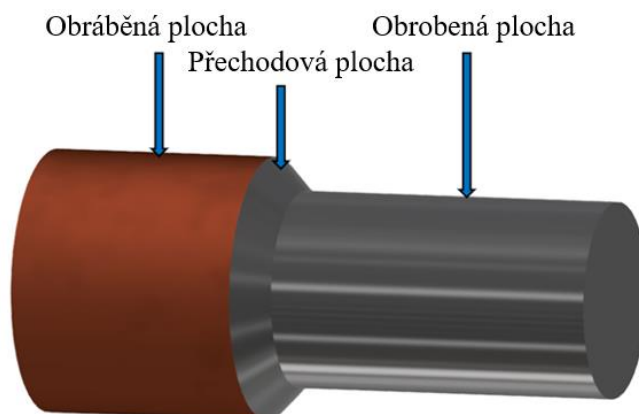
Během experimentu, který probíhal v útrobách dílen ÚST FSI VUT v Brně, je zkoumán vliv řezných podmínek na působení silového zatížení při podélném soustružení oceli 14 109 v zakaleném stavu. I když se jednalo o krátkodobý experiment, je nanejvýš patrné, že důležitost správně zvolených řezných podmínek, kterými jsou řezná rychlost v_c , posuv na otáčku f a šířka záběru ostří a_p , výrazně ovlivňuje velikost dílčích složek řezných sil a výslednou kvalitu povrchu. Určitou roli zde také hraje geometrie zvoleného nástroje, například u výsledné jakosti povrchu je důležitý parametr, kromě posuvu na otáčku f , právě poloměr zaoblení špičky r_ϵ . U silového zatížení hraje důležitou roli zase více šířka záběru ostří a_p nebo orientace úhlu čela γ . Závěrem lze podotknout, že existuje mnoho procesních vlivů pro výběr vhodného nástroje. Díky správné identifikaci obráběcího procesu jako celku skládajícího se z analýzy obráběného materiálu, nastavení řezných podmínek na základě experimentálních výzkumů a tím vybrání vhodného nástroje, jsme schopni zefektivnit proces soustružení jak z hlediska technologického, tak z hlediska ekonomického a splnit tak mnohdy vysoké požadavky strojírenské výroby. Na obr. 0.1 je fotografie použité vyměnitelné břitové destičky během experimentu, kterou dodala firma Dormer Pramet s. r. o. společně s příslušným držákem nástroje.



Obr. 0.1 Vyměnitelná břitová destička pod označením CNGA 120408S01020B, materiál TB310.

1 CHARAKTERISTIKA TECHNOLOGIE SOUSTRUŽENÍ

Soustružení je proces obrábění, kde je za pomoci obvykle jednobřitého nástroje oddělován materiál v podobě třísek v důsledku interakce nástroje s obrobkem. V současné době patří mezi nejrozšířenější a nejpoužívanější obráběcí metody a jedná se o jednoduchou a efektivní formu obrábění kovů. Důležitým faktorem ovlivňující proces soustružení je optimální volba nástroje na požadovaný materiál. Touto metodou lze obrábět součásti rotačního charakteru. Mezi základní rozdělení patří především na soustružení vnější a soustružení vnitřní [1,2,3]. Identifikaci základních ploch na obrobku lze demonstrovat na obr. 1.1.



Obr. 1.1 Identifikace základních ploch při soustružení – podle [1].

Obrobek

Jedná se o objekt obráběcího procesu, který je z geometrického hlediska definován obráběnou, obrobenou a přechodovou plochou.

- Obráběná plocha = plocha, která bude obrobená,
- Přechodová plocha = plocha, kde je v interakci nástroj s obrobkem,
- Obrobená plocha = plocha představující požadující výstup řezného procesu, je určena svými rozměry, tvarem, polohou, vlastnostmi povrchové vrstvy a její strukturou [1,4].

1.1 Nástroj

Nástroj umožňuje v kontaktu s materiálem realizovat samotný proces oddělování třísky. Specifikaci lze provést z geometrického hlediska svými prvky, rozměry ostří a plochami [4]. Na obr. 1.2 je ilustrován soustružnický nůž s popisy jednotlivých částí.

Řezná část

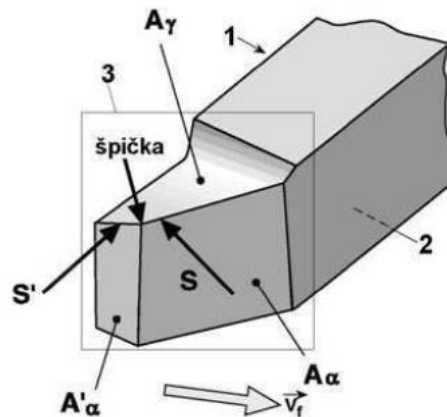
Jedná se o funkční část nástroje sloužící k vytvoření třísky. Tvoří ji čelo, hřbet a ostří [4].

Základna

Bývá zpravidla rovnoběžná k základní rovině nástroje, určuje jeho umístění a orientaci během výroby, kontroly nebo ostření. Není pravidlem, aby měl každý nástroj jasně definovanou základnu [4].

Břit

Určuje vniknutí prvku řezné části do obrobku. Je ohraničený čelem a hřbetem nástroje a může být spojen s hlavním i vedlejším ostřím [5].



Obr. 1.2 Jednotlivé části soustružnického nože [5].

Soustružnický nástroj se skládá s následujícími částmi [1,5]:

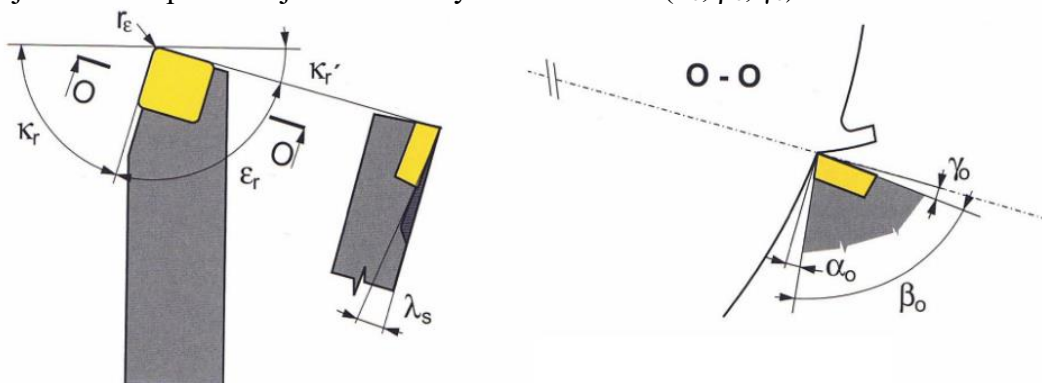
- Stopka (1) sloužící pro upnutí nástroje do nástrojového držáku,
- základna (2),
- řezná část (3),
- špička – může být buď zaoblená nebo sražená,
- S = nástrojové hlavní ostří → realizuje přechodovou plochu,
- S' = nástrojové vedlejší ostří → dokončuje obrobenou plochu, netvoří přechodovou plochu,
- A_α = hřbet nástroje → souhrn ploch směřující k ploše obrobku,
- A'_α = vedlejší hřbet,
- A_γ = čelo nástroje → plocha, kde odchází tříska, tvar čela lze upravit pro snadnější odvod.

1.1.1 Geometrie soustružnického nože

Geometrický tvar a poloha umístění břitů vzhledem k obrobku jsou určeny úhly svírajícími funkční plochy s danými pomocnými rovinami. Pomocí dvou souřadnicových soustav lze určit úhly nástroje, konkrétně se jedná o nástrojovou a pracovní souřadnicovou soustavu. Nástrojová souřadnicová soustava je používána ve statickém pojetí pro určování geometrie břitů během konstrukce, ostření, výroby či kontrole dle platných ISO norem konkrétního nástroje. Používané roviny se nazývají roviny nástrojové [1,6].

Pracovní souřadnicová soustava charakterizuje geometrii nástroje v průběhu procesu obrábění. Úhly jsou závislé na poloze upnutí nástroje, tudíž neplatí výrok, že jsou nástrojové a pracovní úhly vždy shodné [6].

Na obr. 1.3 jsou vyobrazeny úhly v základní nástrojové rovině (κ_r , κ'_r , ϵ_r , λ_s) a v ortogonální nástrojové rovině procházející uvažovaným bodem ostří (α_o , β_o , γ_o).



Obr. 1.3 Nástrojové úhly soustružnického nože [6].

Význam jednotlivých úhlů [5,6,7]:

- Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří $\kappa_r \rightarrow$ velikost ovlivňuje tvar třísky,
- nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří $\kappa'_r \rightarrow$ ovlivňuje společně s r_ϵ výslednou drsnost,
- nástrojový úhel špičky $\epsilon_r \rightarrow$ úhel mezi nástrojovou rovinou hlavního a vedlejšího ostří,
- nástrojový úhel sklonu hlavního ostří $\lambda_s \rightarrow$ velikost a orientace úhlu ovlivňuje směr odchodu třísky i odolnost bříty,
- nástrojový ortogonální úhel hřbetu $\alpha_o \rightarrow$ ovlivňuje třecí podmínky řezu a opotřebení bříty,
- nástrojový ortogonální úhel bříty $\beta_o \rightarrow$ úhel řezného klínu, velikost ovlivňuje řezný odpor,
- nástrojový ortogonální úhel čela $\gamma_o \rightarrow$ ovlivňuje průběh plastických deformací při tvorbě třísky a tím i velikost řezných sil nebo tepelného zatížení bříty,
- poloměr zaoblení špičky $r_\epsilon \rightarrow$ velikost poloměru ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu.

1.2 Kinematika soustružení

Tato problematika je důležitá především z hlediska definice kinematických veličin, které jsou ovlivňovány řeznými parametry, které mohou mít vliv na výslednou drsnost povrchu, opotřebení nástroje a charakteristiku odvedené třísky [7].

Během soustružení se realizuje hlavní pohyb a pohyb vedlejší, přičemž hlavní pohyb je rotační a vykonává jej obrobek. Je definován vztahem pro řeznou rychlost (1.1) [3].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.1)$$

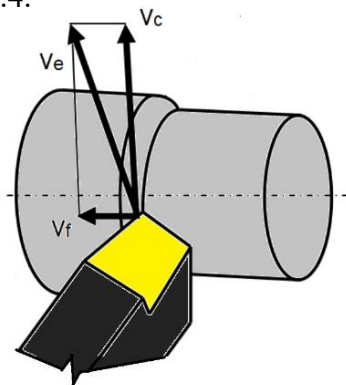
Vedlejší (posuvový) pohyb vůči obrobku je realizován soustružnickým nožem a definován posuvovou rychlostí, která je dána velikostí posuvu na otáčku a otáčkami vřetena (1.2) [3].

$$v_f = \frac{f \cdot n}{1000} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.2)$$

Vektorovým součtem řezného a posuvového pohybu dostaneme výsledný efektivní pohyb zapsaný ve skalárním tvaru (1.3) [3].

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (1.3)$$

Z výše uvedených parametrů vyplývá, že výsledné hodnoty rychlostí jsou ovlivněny zejména veličinami průměru obrobku D a otáčkami vřetena n . Směry vektorů hlavního a vedlejšího pohybu jsou znázorněny na obr. 1.4.



Obr. 1.4 Směry vektorů hlavního a vedlejšího pohybu při podélném soustružení – podle [1].

1.3 Tepelné účinky obrábění

Mechanická energie E_e , která je vynaložena na tvorbu třísky je téměř všechna přeměňována na tepelnou energii (v rozsahu 95–98 %). Většina tepla je tvořena v oblasti stříhu. Menší hodnoty jsou generovány třením mezi třískami, obrobkem a řeznou hranou. Právě tato zbytková část je uložena jako elastická energie ve zbytkových třískách a ve zbytkové napjatosti obrobeného povrchu. Teplota na řezné hraně je závislá především na materiálu obrobku (třísky), řezných podmínkách a geometrii řezné hrany, či tepelné vodivosti břitové destičky. Teplota během obrábění také ovlivňuje výslednou životnost a opotřebení břitové destičky. Nejefektivněji odvádí teplo z řezného procesu tříska [3,8].

Následující vztah (1.4) vymezuje výše uvedené zdroje tepla, respektive jeho tvorby [9]:

$$Q = Q_{sh} + Q_{tr} + Q_f \quad [J] \quad (1.4)$$

Teplo se dále šíří konvekcí a vedením do obrobku (Q_o), nástroje (Q_n), třísky (Q_t) a prostředí (Q_p) v závislosti od teplotního gradientu [9].

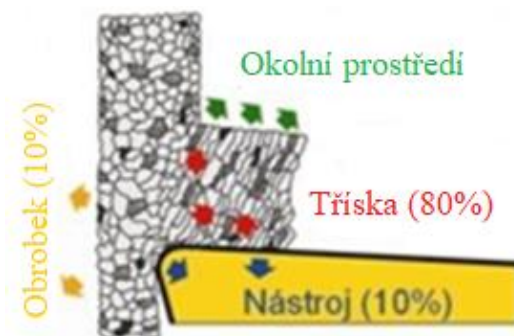
Dosažením těchto výše uvedených parametrů do rovnice se určí tepelná bilance, která vypovídá o tom, že v určitém místě v daném časovém úseku je množství odvedeného tepla rovno teplu, které se do místa přivede (viz vztah 1.5) [9].

$$Q = Q_{sh} + Q_{tr} + Q_f = Q_o + Q_n + Q_t + Q_p \quad [J] \quad (1.5)$$

Řezný proces je negativně ovlivněn vzniklým teplem, jelikož [3]:

- Ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu,
- ovlivňuje zpevňování a pěkchování materiálu,
- ovlivňuje podmínky tření na hřbetě i čele nástroje,
- řezné vlastnosti jsou nepříznivě ovlivněny.

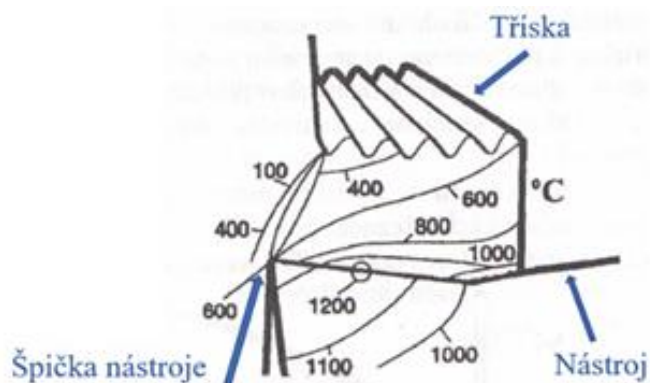
Rozložení tepla je ilustrováno na obr. 1.5, kde je nejvíce tepla akumulováno právě v třísce.



Obr. 1.5 Rozložení tepla v technologii obrábění kovů [8].

1.3.1 Teplotní pole obrobku

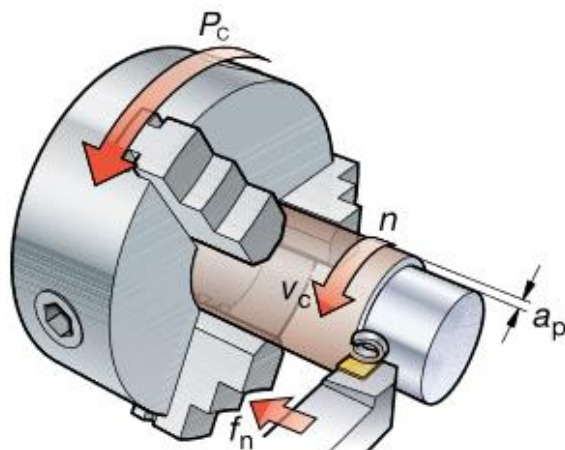
Řezná rychlost má významný vliv na průběh teplot během obrábění materiálu. Pokud je řezná rychlost nižší, maximální teplota se akumuluje v oblasti špičky nástroje. Pokud obrábíme vyšší řeznou rychlostí, tak maximální teplota se nachází v určité vzdálenosti od ostří nástroje [1]. Teplotní pole lze měřit různými kamerovými systémy propojenými s počítačem. Při aplikaci standardních měřicích metod se používají tzv. termočlánky, kde se měří střední teplota všech stykových ploch [5]. Příklad teplotního pole obrobku, třísky a nástroje je na obr. 1.6.



Obr. 1.6 Teplotní pole obrobku, třísky a nástroje během ortogonálního řezání – podle [1].

1.4 Výkon při soustružení

Potřebný řezný výkon stroje je požadován při soustružení hlavně pro operace hrubování, kde je požadavek na odebrání materiálu v co možno největším množství, které je nástroj schopen odebrat. Požadovaná výkonnost obrábění je také důležitým faktorem pro výběr vhodného stroje [10]. Základní parametry pro výpočet řezného výkonu je na obr 1.7.



Obr. 1.7 Parametry pro výpočet řezného výkonu [10].

Řezný výkon (dle vztahu 1.6) je dán součinem řezné rychlosti a řezné síly, přičemž řeznou rychlost a řeznou sílu lze rozepsat v následujícím tvaru [10]:

$$P_c = \frac{v_c \cdot a_p \cdot f \cdot k_c}{60 \cdot 10^3} \text{ [kW]} \quad (1.6)$$

Analogicky se vypočte výkon potřebný pro posuv P_f , který je vyjádřen jako součin posuvové síly F_p a rychlosti posuvu v_f . Nicméně ve srovnání s řezným výkonem je hodnota výkonu potřebného pro posuv P_f zanedbatelná, proto se pro účely stanovení potřebného výkonu při obrábění udává řezný výkon P_c [4,11].

1.5 Řezné síly při soustružení

Celková řezná síla je vyvolaná působením řezné části nástroje na obrobek a značí se písmenem F . Pro její analýzu se řezná síla rozkládá do geometrických složek souřadného systému [1]. Řeznou sílu při soustružení lze vypočítat ve formě empirických vztahů, které zahrnují řezné podmínky (šířka záběru ostří a_p a posuv na otáčku f) a vlastnosti obráběného materiálu. Celková řezná síla se dělí na následující složky: řeznou (F_c), posuvovou (F_f) a pasivní (F_p) viz obr. 1.8. Vztahy jsou převzaty z literatur [3,4].

a) Výpočet celkové řezné síly pomocí empirických vztahů

- Řezná síla F_c

$$F_c = C_{Fc} \cdot a_p^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [\text{N}] \quad (1.7)$$

- Posuvová síla

$$F_f = C_{Ff} \cdot a_p^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [\text{N}] \quad (1.8)$$

- Pasivní síla

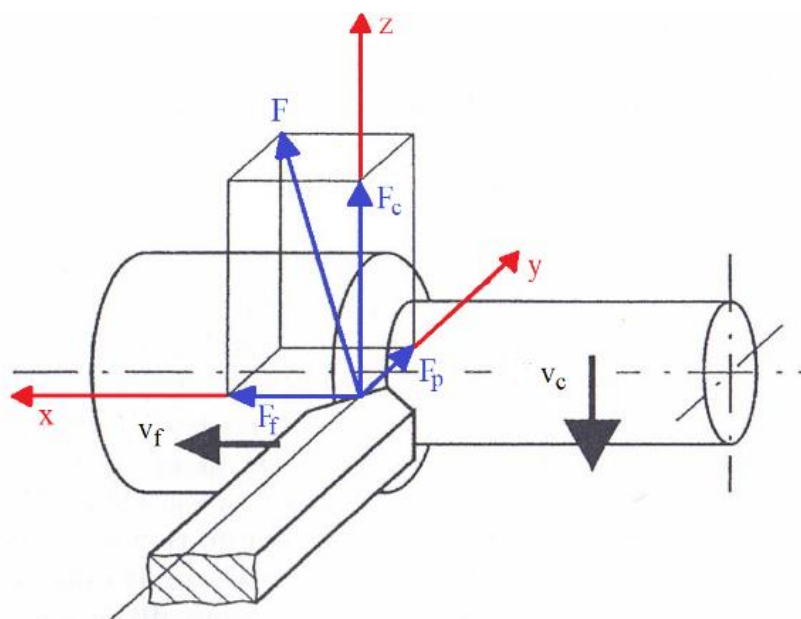
$$F_p = C_{Fp} \cdot a_p^{x_{Fp}} \cdot f^{y_{Fp}} \quad [\text{N}] \quad (1.9)$$

- Celková řezná síla pro soustružení

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [\text{N}] \quad (1.10)$$

kde: C_{Fc}, C_{Ff}, C_{Fp} [-] - materiállové konstanty,
 x_{Fc}, x_{Ff}, x_{Fp} [-] - exponenty vlivu šířky záběru ostří,
 y_{Fc}, y_{Ff}, y_{Fp} [-] - exponenty vlivu posuvu.

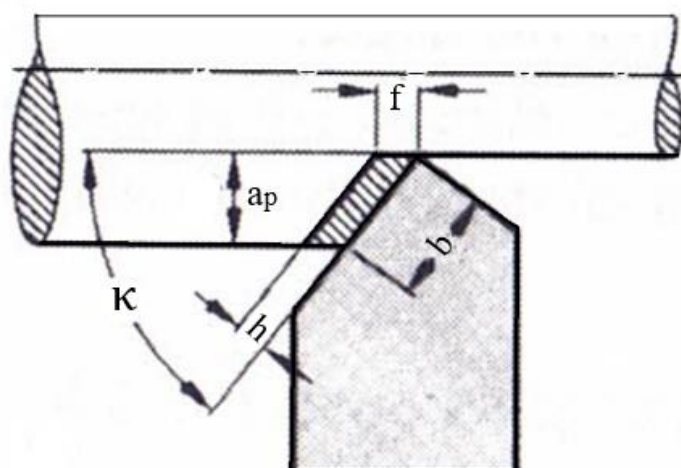
Tyto exponenty jsou pro dané podmínky procesu stanoveny empiricky [4].



Obr. 1.8 Rozklad celkové řezné síly F do souřadného systému při podélném soustružení – podle [9].

b) Výpočet řezné síly aplikací měrné řezné síly

Pro známou velikost měrné řezné síly k_c je možné vypočítat řeznou sílu F_c za pomoci znalosti plochy jmenovitého průřezu třísky A_D . Na jmenovitý průřez třísky má vliv její šířka a tloušťka, schématické znázornění je na obr. 1.9 [1,11].



Obr. 1.9 Parametry určující jmenovitý průřez třísky [11].

Pro výpočet průřezu třísky lze vyjít z následujících vztahů [11]:

- Šířka třísky

$$b = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad (1.11)$$

- Tloušťka třísky

$$h = f \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}] \quad (1.12)$$

- Jmenovitý průřez třísky

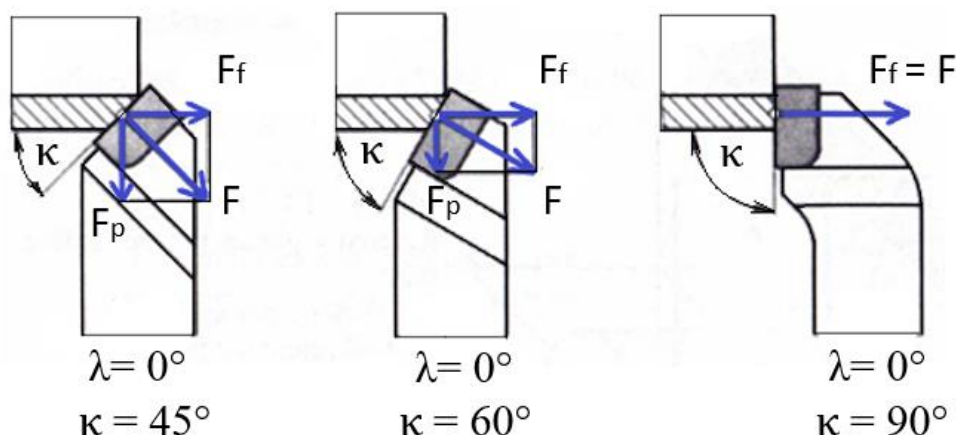
$$A_D = a_p \cdot f = b \cdot h \quad [\text{mm}^2] \quad (1.13)$$

Pro výpočet řezné síly F_c platí [3]:

$$F_c = k_c \cdot A_D \quad [\text{N}] \quad (1.14)$$

Měrným řezným odporem k_c rozumíme sílu působící ve směru hlavního řezného pohybu, která je vztažena na jmenovitý průřez třísky o 1 mm^2 . Velikost měrného řezného odporu pak určuje zejména obráběný materiál a jeho tvrdost, řezné prostředí, geometrie nástroje a také tloušťka odebírané třísky [3].

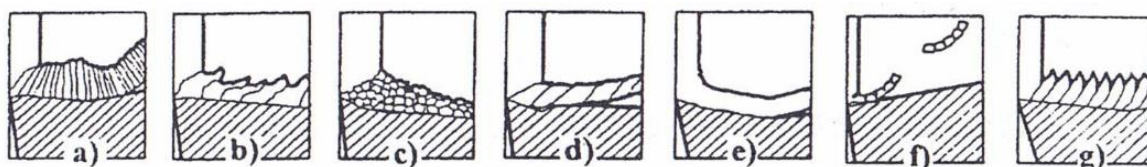
Důležitou roli pro studium řezné síly také hraje úhel nastavení hlavního ostří κ_r , který má vliv na směr působení výsledné síly, vybrané možnosti jsou na obr. 1.10. Dále je patrné, že při zvětšujícím se úhlu nastavení hlavního ostří κ_r se zmenšuje složka pasivní síly F_p natolik, že při $\kappa_r = 90^\circ$ nabývá nulové hodnoty [11].



Obr. 1.10 Vliv úhlu nastavení hlavního ostří na směr výsledné řezné síly – podle [11].

1.6 Kvantifikace a druhy třísek

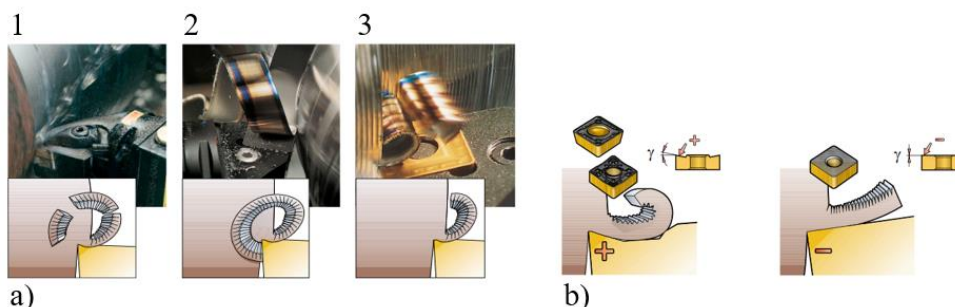
Správný tvar a odvod třísek je důležitou technologickou charakteristikou, která vypovídá o správném průběhu řezného procesu. Kontrolovatelný odchod třísek patří mezi základní předpoklady, které vedou k dosažení požadovaných parametrů výsledného produktu. V závislosti na způsobu obrábění lze rozdělit třísky na následující tvary (viz obr. 1.11) [2,3,4].



Obr. 1.11 Druhy tvářených třísek během soustružení [4].

a) plynulá článkovitá soudržná tříska, b) plynulá soudržná lamelová tříska, c) tvářená elementární tříska, d) nepravidelně článkovitá plynulá tříska, e) tvářená plynulá soudržná tříska, f) dělená segmentová tříska a g) plynulá segmentová tříska

Z hlediska soustružení se doporučují třísky elementární a článkovité před třískami plynulými soudržnými, které mohou negativně ovlivnit životnost břitů. Na vhodné utváření má vliv především materiál obrobku, šířka záběru ostří, posuv a volba geometrie břitové destičky [6]. Právě geometrie břitové destičky, zejména orientace úhlu čela má významný vliv na způsobu lomu třísky, a tím i ovlivnění a dosažení požadovaného tvaru třísky. Existují tři základní způsoby lomu třísky (obr. 1.12a), konkrétně se jedná o samočinný lom (1), lom třísky na nástroji (2) a lom třísky při nárazu o obrobek (3). Ideální případ nastává, pokud je tříska odlomena samočinně. V případě lomu třísky o nástroj či obrobek může nastat zhoršení požadované kvality plochy nebo rychlejší opotřebení břitové destičky. Vliv pozitivního a negativního úhlu čela na lom třísky je znázorněn na obr. 1.12b [2,10].



Obr. 1.12 a) způsoby lomu třísky, b) vliv úhlu čela na tvar třísky [10].

1.7 Používané druhy nástrojů

Nástroje je možné z technologického hlediska dělit na: radiální, prizmatické a tangenciální. Radiální nože, které se ve strojírenské výrobě používají nejvíce, lze dále dělit podle směru posuvu, konstrukce, způsobu obrábění a typu obráběného materiálu [2,5,12].

Z hlediska konstrukce se soustružnické nože dělí na [5]:

- celistvé → nástroj je celý z nástrojového materiálu
- s pájenými břitovými destičkami → tělo nože je z konstrukční oceli a připájený břit je z nástrojové oceli
- s vyměnitelnými břitovými destičkami → břitová destička je podle upínacího systému ISO upnuta v nástrojovém držáku z konstrukční oceli.

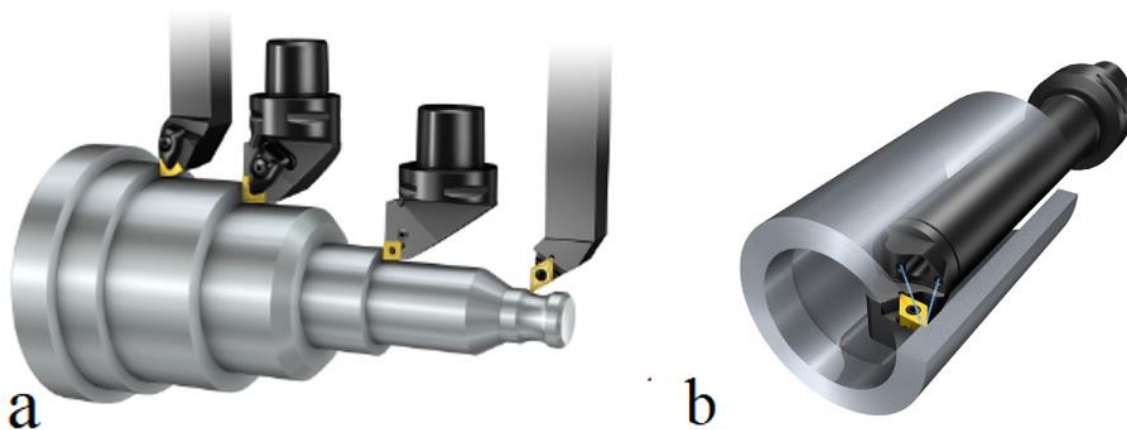
Z hlediska směru posuvového pohybu se radiální nože dělí na [12]:

- pravé a levé.

Z hlediska způsobu obrábění jsou uzpůsobeny radiální nože na soustružení [12]:

- vnitřní a vnější.

Na obr. 1.13a jsou radiální nože s vyměnitelnými břitovými destičkami používané pro vnější soustružení. Lze si povšimnout, že břitové destičky jsou mnoha různých tvarů, které jsou uzpůsobeny zejména požadovanému tvaru obrobku, či způsobu obrábění (hrubování, dokončování, profilování). Na obr. 1.13b je nástroj užívaný pro vnitřní soustružení, zde je především důležitá konstrukce těla nože, aby se nástroj mohl dostat i do obtížně dostupných ploch a děr obrobku.



Obr. 1.13 a) vnější soustružení, b) vnitřní soustružení [10].

1.7.1 Volba nástroje a vyměnitelné břitové destičky

Pro výběr vhodného typu nástroje a břitové destičky je vhodné se zaměřit především na [2]:

- Druh upínacího systému vyměnitelné břitové destičky,
- velikost a typ držáku nástroje,
- tvar, velikost, geometrie a poloměr špičky vyměnitelné břitové destičky,
- řezný materiál a řezné podmínky.

Upínací systémy vyměnitelné břitové destičky

Rozhodující pro správnou volbu je především druh operace a také velikost obráběné součásti. Upínací systémy jsou rozděleny do různých typů, jakým způsobem se upíná vyměnitelná břitová destička do lůžka. Existují upnutí typu P, D, M, S nebo C (obr. 1.14) [2,13].



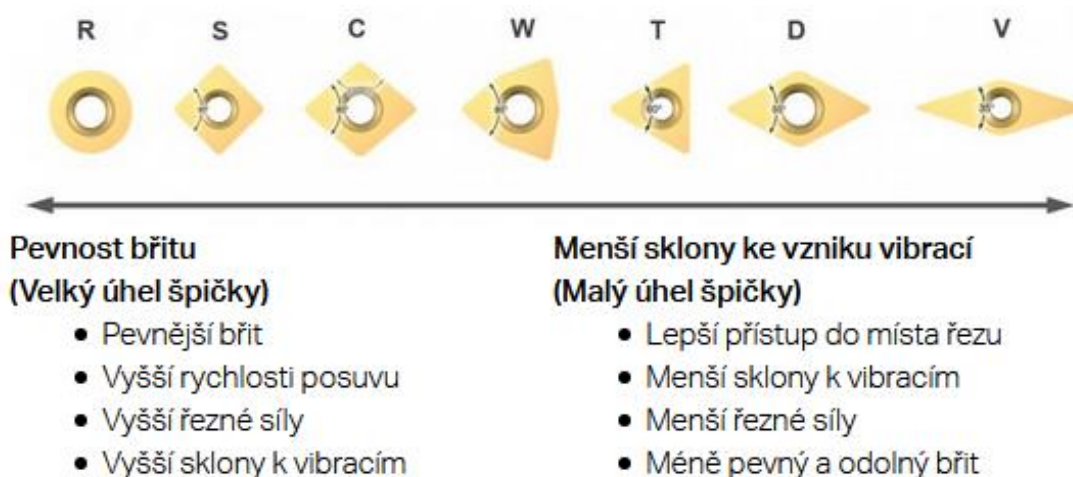
Obr. 1.14 Typy upnutí vyměnitelných břitových destiček [13].

Velikost a typ držáku nástroje

Volba je ovlivněna několika faktory, např. směrem posuvu, řeznými podmínkami, způsobu upnutí nástroje a obrobku. Typ držáku nástroje se dále řídí tvarem vyměnitelné břitové destičky, jelikož tím lze nadefinovat úhel nastavení hlavního ostří a úhel špičky. Mezi základní pravidla patří volba co největšího držáku z důvodu získání tuhosti a stability během soustružení [2].

Tvar, velikost, geometrie a poloměr špičky vyměnitelné břitové destičky

Tvar břitové destičky je vhodný volit pro realizovatelný vstup do místa řezu s ohledem na její geometrii. Úhel špičky určuje pevnost břitové destičky, čím je větší, tím je pevnost vyšší, ale je kladen vyšší požadavek na výkon stroje a mohou být způsobeny vyšší sklony k vibracím. Na obr. 1.15 lze demonstrovat, jak tvar destičky ovlivňuje pevnost břitu nebo sklony k vibracím. Stabilita a způsob operace soustružení nám dává informaci o volbě velikosti destičky [14]. Pro hrubovací operace jsou doporučeny destičky s větší pevností břitu, pro operace dokončovací jsou doporučeny destičky s menším úhlem špičky.



Obr. 1.15 Tvary břitových destiček a jejich vlastnosti v závislosti na poloměru špičky [14].

Poloměr špičky nástroje je klíčovým faktorem pro výslednou kvalitu obrobenej součásti. Pro lepší drsnost povrchu je doporučeno použít větší poloměr špičky v závislosti na velikosti posuvu na otáčku, což vede k optimalizaci procesu z hlediska doby nástroje v místě řezu. K zamezení vzniku vibrací je nutné, aby šířka záběru ostří nebyla menší než dvě třetiny poloměru zaoblení špičky [2,7].

Řezný materiál a řezné podmínky

Volba řezného materiálu je velice rozsáhlá vědní disciplína mající pro správnou funkci velký vliv. Vývoji řezným materiálům je věnována značná pozornost. Podle druhu obráběného materiálu se pak volí vhodný typ řezného materiálu. Mezi hlavní kategorie řezných materiálů patří slinuté karbidy (povlakované, nepovlakované), cermety, řezná keramika, kubický nitrid bóru a polykrystalický diamant [2]. Podrobnější informace jsou uvedeny v 2. kapitole. Řezné podmínky jsou většinou dostupné v katalogích výrobců břitových destiček. Pro volbu řezných podmínek je opět vycházeno z obráběného materiálu, stavu obráběcího stroje a jeho výkonu apod. Mezi základní řezné parametry patří řezná rychlost v_c , posuv na otáčku f a šířka záběru ostří a_p [2].

1.8 Vybrané vlastnosti tvrdého obrábění

Konvenční metody výroby rotačních součástí zahrnují hrubovací operace ocelí, které jsou nejčastěji ve vyžíhaném stavu, následně tepelně zpracované, kdy ocel dosahuje tvrdosti od 50 do 70 HRC. V tomto stavu pak probíhají dokončovací operace (broušení, lapování, superfinišování, apod.). Snaha zkrácení výrobních časů a optimalizace procesů vedla k redukci používání požadovaných technologií. A právě takzvané tvrdé obrábění, tj. obrábění ocelí o tvrdosti 55 HRC a vyšší, vedlo k tomu, že vzniká snaha tyto dokončovací operace dokončovat již např. na CNC soustruzích namísto použití technologie broušení. Právě použití vyměnitelných břitových destiček z polykrystalického kubického nitridu boru (PKNB) se ukazuje jako vhodná alternativa za broušení [7,9,15].

Mezi hlavní charakteristiky soustružení kalených ocelí patří [9,15]:

- Aplikace menších hodnot šířky záběru ostří a posuvových rychlostí oproti soustružení před tepelným zpracováním
- obrábění bez použití řezných kapalin,
- vysoké řezné síly (především pasivní síla F_p) a teploty, které ovlivňují trvanlivost řezného materiálu
- vytváření segmentové třísky, která má kratší dobu kontaktu na čele nástroje → intenzita plastické deformace je menší a lokalizována do užších oblastí břitu.

Mezi přednosti soustružení kalených ocelí patří [7,9]:

- Zvýšení produktivity a zkrácení strojních časů, vysoký úběr materiálu než při broušení
- vysoká kvalita obrobenej součástí,
- provozní flexibilita a menší strojní investice,
- nízká energetická náročnost,
- environmentální aspekt obrábění bez použití procesní kapaliny,
- břitové destičky z PCBN jsou odolné vůči vysokým řezným silám a teplotám v řezu.

Mezi nevýhody technologie soustružení kalených ocelí patří [9]:

- Menší hodnoty rychlosti posuvu a šířky záběru ostří,
- nebezpečí poškození hrotu břitu nástroje vlivem vysokých zatížení řezného klína břitu,
- vysoká pasivní složka síly (F_p), která je způsobena vysokou hodnotou tvrdosti materiálu,
- během soustružení za sucha vzniká v místě řezu tření, které generuje vyšší hodnoty teplot, které mohou mít negativní dopad na nástroj a obrobek.

2 CHARAKTERISTIKA ŘEZNÝCH MATERIÁLŮ

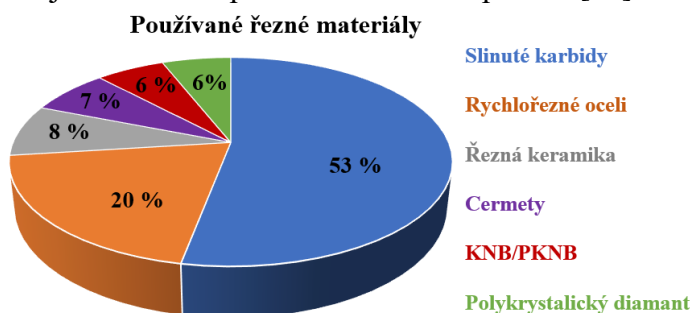
Mezi klíčové rozhodnutí o úspěšném a ekonomicky výhodném způsobu obrábění patří správná volba druhu řezného materiálu. Obrábění kovů prošlo během své historie různými změnami, například zvyšováním řezných rychlostí a s tím spojené zvyšování produktivity. Toto mělo za následek neustálý vývoj nových řezných materiálů [16].

K základním požadavkům, které musí nástrojový materiál zvládnout patří jeho houževnatost, tvrdost, odolnost proti opotřebení a tepelná vodivost [4].

Pro výrobu řezných materiálů a jejich částí se nejčastěji používají [4,17]:

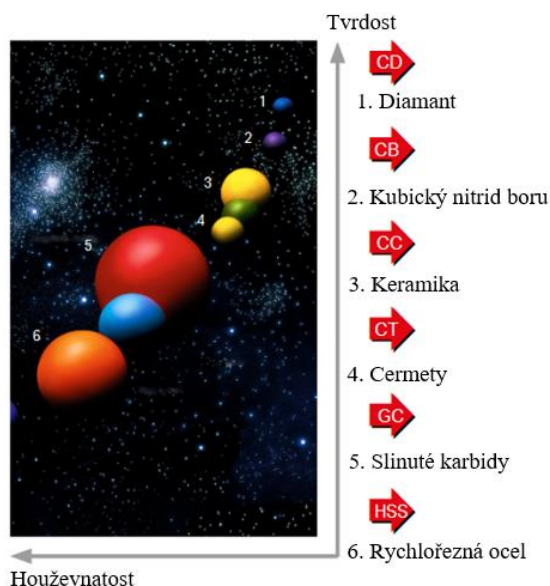
- Rychlořezné oceli (HSS),
- slinuté karbidy,
- cermety,
- řezná keramika,
- kubický nitrid boru (KBN,PKNB),
- polykrystalický diamant (PKD).

Jejich rozsah a přehled použití ukazuje obr. 2.1. Nejrozšířenější řezný materiál je v dnešní době slinutý karbid, který zaujímá více než polovinu z rozsahu použití [17].



Obr. 2.1. Přehled používaných řezných materiálů – podle [17].

Obr. 2.2 pak ukazuje tvrdost a houževnatost obráběného materiálu jako výchozí bod pro identifikaci vlastností řezného materiálu. Za nejtvrdší materiál se považuje diamant, který je ale málo houževnatý. Kubický nitrid boru je využíván zejména na obrábění kalených ocelí. Tvrdost řezného materiálu musí být větší než tvrdost obráběného materiálu, aby se mohla odřezávat tříška [18]. Za kompromis mezi tvrdostí a houževnatostí lze označit povlakovaný slinutý karbid.



Obr. 2.2 Rozdělení řezných materiálů podle tvrdosti a houževnatosti – podle [10].

2.1 Rychlořezné oceli

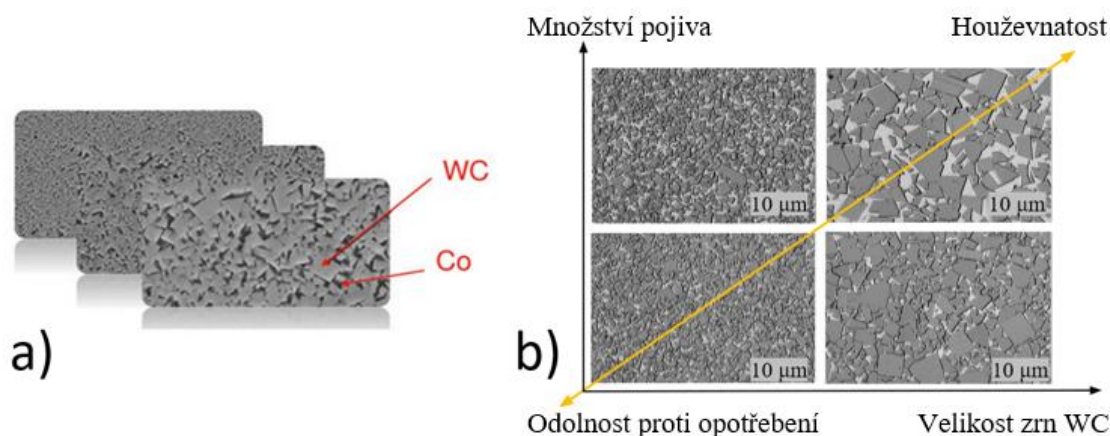
Tyto oceli lze nalézt pod anglickou zkratkou HSS (high speed steel). Druh tohoto řezného materiálu je zařazen mezi ušlechtilé oceli, z kterých se zhotovují nástroje na obrábění, řezání, tváření a další technologické operace. Rychlořezná ocel je zařazena mezi nástrojové oceli a podle chemického složení patří mezi vysoce legované, zejména obsahem wolframu. V porovnání s ostatními nástrojovými oceli třídy 19 mají několikanásobně vyšší řezivost a dobrou pevnost v ohybu. Důležitým požadavkem je vysoká tvrdost a odolnost proti popouštění. Rychlořezné oceli lze použít do maximální teploty v místě řezu okolo 550 °C až 600 °C, tyto hodnoty teplot jsou závislé na volbě řezného prostředí (emulze nebo řezné oleje) [4,18,20]. Hlavní přísadové prvky oceli jsou [19]:

- Wolfram (W) v rozmezí od 5 do 20 % → zvětšuje řezivost nástroje, s uhlíkem (C) vytváří v oceli sloučeninu karbidu wolframu, který dodává nástroji tvrdost a odolnost proti otěru,
- chrom (Cr) v rozmezí okolo 4 % → zlepšuje kalitelnost,
- vanad (V) v rozmezí 1 až 4 % → zvětšuje odolnost proti opotřebení,
- výkonnější rychlořezné oceli dále mohou obsahovat kobalt (Co) v rozmezí od 5 do 10 %, u některých druhů může být wolfram nahrazen molybdenem (Mo).

Rychlořezné oceli lze rozdělit dále na oceli pro běžné výkony, oceli výkonné a oceli vysoce výkonné. Mezi známé zástupce rychlořezných ocelí patří tzv. ocel RADECO, s označením oceli 19 810. Obecně jsou rozděleny do třídy 19 8xx, které se dále kalí a popouští [19].

2.2 Slinuté karbidy

V současné době se jedná o nejpoužívanější druh řezného materiálu. Slinuté karbidy jsou vyráběny práškovou metalurgií, kde je jejich struktura tvořena karbidy vysocetavitelných kovů. Základním karbidem pro výrobu jak nepovlakovaných, tak i povlakovaných slinutých karbidů je karbid wolframu (WC). Jako pojící kov se používá kobalt (Co), mikrostruktura je na obr. 2.3a. Mezi další složky, které se také používají, jsou karbidy titanu (TiC), tantalu (TaC), niobu (NbC) a chromu (Cr₃C₂). Velikost těchto tvrdých částic karbidů se pohybuje v rozmezí od 0,1 μm do 10 μm. Podle druhu, velikosti, rozmístění a procentuálním zastoupením společně s kobaltovým pojivem je určena tvrdost nebo houževnatost, či jiné mechanické vlastnosti břitové destičky ze slinutého karbidu (viz obr. 2.3b), kdy tvrdost nebo odolnost proti opotřebení ovlivňuje zejména vyšší podíl částic karbidů, naproti tomu houževnatost destičky je dána podílem obsaženého pojiva (Co). Výhody jsou oproti nástrojům z rychlořezné oceli (HSS) v tvrdosti a vyšší pevnosti v tlaku nebo v možnosti zvýšení řezných rychlostí [3,18,21,22].



Obr. 2.3 Slinutý karbid: a) karbid wolframu (WC) + pojivo kobaltu (Co) [25], b) vliv velikosti karbidů a množství pojiva na tvrdost a houževnatost materiálu – podle [10].

2.2.1 Nepovlakované slinuté karbidy

Nepovlakované slinuté karbidy jsou označovány symboly HW nebo HF a podle normy ČSN ISO 513 jsou rozděleny do základních třech skupin P, M a K, podle druhu obráběného materiálu a použití. Mimo tyto základní skupiny jsou rozděleny jak povlakované, tak i nepovlakované slinuté karbidy do dalších skupin, konkrétně pak skupiny N, S a H. Složení karbidů a pojící složky podle třech základních ISO skupin je následující [3,21]:

- Skupina K: typ WC + Co,
- skupina P: typ WC + TiC/TaC + Co
- skupina M: typ WC + TiC + TaC.NbC + Co.

Podrobnější popis skupin a rozdělení dle ISO 513 je obsažen v tab. 2.1, kde jsou skupiny dále rozděleny na podskupiny, které přesněji sdružují materiály, které vyvolávají kvalitativně stejný typ namáhání břitů, tudíž i podobné opotřebení. Tyto aspekty jsou důležité mimo jiné také na volbu startovních řezných podmínek procesu [6]. Pro účely této diplomové práce a pro účely soustružení kalených materiálů s pomocí materiálu vyměnitelné břitové destičky PKNB je obráběný materiál zařazen do skupiny H.

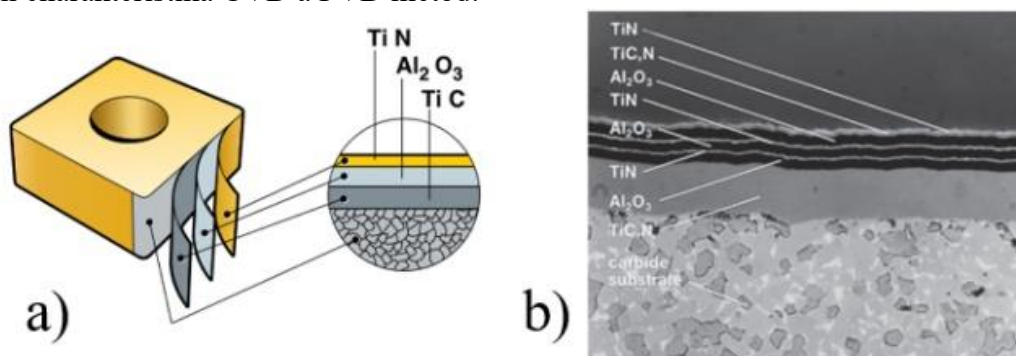
Tab. 2.1 Rozdělení obráběných materiálů dle ISO 513 – podle [3,6,13].

Skupina	Podskupina	Definice podskupiny
P	P1	Oceli a ocelolitiny s velmi dobrou obrobitelností, nízkouhlíkové a automatové oceli
	P2	Nelegované a nízkolegované oceli se středním obsahem uhlíku C = 0,25 % až 0,55 % s pevností do 900 MPa a tvrdostí HB = 160 až 255
	P3	Hůře obrobitelné nelegované a nízkolegované oceli se středním obsahem uhlíku s pevností do 1000 MPa a tvrdostí do 300 HB
	P4	Středně až vysoce legované oceli s obsahem uhlíku C > 0,55 % s pevností okolo 1250 MPa a tvrdostí 375 HB (= 40 HRC)
M	M1	Feritické korozivzdorné oceli s dlouhou i krátkou třískou
	M2	Martenzitické korozivzdorné oceli
	M3	Austenitické korozivzdorné oceli
	M4	Feriticko-austenitické oceli (duplexní), slitiny žáruvzdorné a žárupevné
K	K1	Šedé litiny nelegované i legované
	K2	Temperované litiny
	K3	Tvárné litiny feritické a feriticko-perlitické
	K4	Tvárné litiny feritické a feriticko-perlitické, perliticko-sorbitické a perlitické
N	N1	Hliník Al s nízkým obsahem křemíku Si (tvářený, litý) s tvrdostí do 100 HB
	N2	Tvrdé slitiny hliníku Al s vysokým obsahem křemíku Si
	N3	Měkké slitiny mědi Cu, automatová mosaz, ostatní měkké mosazi a bronz
	N4	Hůře obrobitelné mosazi a slitiny mědi Cu
S	S1	Technicky čistý titan Ti
	S2	Speciální žárupevné slitiny na bázi železa Fe
	S3	Speciální žárupevné slitiny na bázi niklu Ni
	S4	Speciální žárupevné slitiny na bázi kobaltu Co
H	H1	Vysoce pevné a tvrdé nástrojové oceli, kalené a zušlechtěné oceli o tvrdosti 40 až 50 HRC
	H2	Tvrzená a bílá litina o tvrdosti 350 až 600 HV
	H3	Kalené a zušlechtěné oceli o tvrdosti v rozmezí 50 až 55 HRC
	H4	Kalené a zušlechtěné oceli o tvrdosti vyšší než 55 HRC

Ve všech rozdělení tříd slinutých karbidů platí, že zvyšující se číslo dané třídy charakterizuje materiál vyšším podílem pojiva, větší houževnatostí a použitím zejména v hrubovacích operacích soustružení s nízkou řeznou rychlostí a vyšším posuvem. Naopak u nižších označeních tříd slinutých karbidů jsou vlastnosti opačné, tedy je zde použito vyšších řezných rychlostí a nižších rychlostí posuvových, což je charakteristické pro dokončovací soustružení s nepřerušovaným řezem. Karbidové částice mají vyšší podíl a pojivo nižší, což způsobuje křehkost, ale je větší odolnost proti difuzi a plastické deformaci [3].

2.2.2 Povlakované slinuté karbidy

Jedná se o kombinaci slinutého karbidu a povlaku. Průkopníkem první povlakované břitové destičky je firma Sandvik Coromant (rok 1969), konkrétně se jednalo o povlak TiC a tloušťce vrstvy 4 až 5 μm . Později se na trhu objevily a byly vyvinuty povlaky typu TiN a TiCN, posléze pak povlak Al_2O_3 . Povlaky byly vyráběny metodou CVD (chemické napařování). Další metoda PVD (fyzikální napařování) se objevila na začátku 80.let, kdy byl nejužívanější TiN povlak [5,21,23]. Na obr. 2.4 jsou znázorněny povlakované vrstvy slinutého karbidu a příklad mikrostruktury povlaků nanesených metodou CVD. V textu níže je následně stručně uvedena základní charakteristika CVD a PVD metod.




Obr. 2.4 Příklady povlaků břitových destiček: a) slinutý karbid s karbidovým substrátem a třemi nanesenými povlaky [10], b) mikrostruktura vícevrstvého povlaku vyrobená metodou CVD [24].

V literaturách se obvykle uvádějí 4 vývojové stupně povlakovaných slinutých karbidů [21]:

- 1. generace: Jednovrstvý povlak (zejména TiC) o tloušťce 6 μm se zhoršenou soudržností povlaku a podkladu, což vedlo k odlupování povlaku.
- 2. generace: Jednovrstvý povlak (TiC, TiN a TiCN) o tloušťce 7–10 μm , díky zlepšeným výrobním technologiím nedocházelo k odlupování povlaků, do této generace patří zejména slinuté karbidy od firem Pramet a Sandvik Coromant (pro třídy materiálů typu P).
- 3. generace: Vývoj vícevrstvých povlaků, které jsou na sobě seřazeny tak, že na podkladu jsou vrstvy s lepší přilnavostí, zatímco poslední vrstvy mají vysokou tvrdost a odolnosti proti opotřebení. Na podklad se převážně nanáší vrstvy TiC nebo TiN, naproti tomu vrstva Al_2O_3 bývá řazena mezi posledními.
- 4. generace: Speciální vícevrstvé povlaky o vysokých tvrdostech (až 3000 HV) mající často i více než 10 vrstev. Za povlaky 4. generace jsou považovány například diamantové, gradientní, či kompozitní. Vývoj do budoucnosti je zaměřen na povlaky z kubického nitridu boru (na křemíkovém substrátu a substrátu slinutého karbidu).

Tab. 2.2 Základní vlastnosti vybraných povlaků – podle [5,21].

	Chemická stabilita	Odolnost proti oxidaci	Tvrdost	Tvrdost za tepla
<div style="text-align: center;"> <p>Nejlepší</p>  <p>Špatná</p> </div>	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiC	Al ₂ O ₃
	TiAlN	TiAlN	TiCN	TiAlN
	TiN	TiN	Al ₂ O ₃	TiN
	TiCN	TiCN	TiAlN	TiCN
	TiC	TiC	TiN	TiC

Metoda CVD (Chemical Vapor Deposition)

Metoda spočívá v chemickém napařování z plynné fáze probíhající za vysokých teplot v rozmezí 700 až 1500 °C. Chemický proces probíhá reakcí plynných chemických sloučenin v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového slinutého karbidu. Poté se produkty reakce na tomto povrchu uloží. Přiváděným plynem může být např. argon Ar nebo H₂, který dopravuje danou směs plynů a povlakované destičce a ovlivňuje rychlost růstu vrstvy povlaku. Metoda může být realizována ve třech variantách: tepelně indukovaná, plazmaticky aktivovaná a fotonově indukovaná (laserem) [5,18]. Mezi výhody metody CVD patří velmi dobrá přilnavost ke karbidovému substrátu a odolnost proti opotřebení, možnost vyrábět povlaky tvořené oxidy nebo vysoká hustota povlaku (až do 20 μm). Nevýhodou této metody jsou vysoké pracovní teploty [10,18].

Metoda PVD (Physical Vapor Deposition)

Metoda je typická nižšími pracovními teplotami oproti metodě CVD (400 až 600 °C). Povlaky jsou nanášeny odpařením z pevné fáze. Proces se skládá z postupného odpaření kovu, který reaguje s chemickými prvky (např. dusíkem N), přičemž na břitové destičce vznikne tvrdý nitridový povlak. Další metodou je metoda napařování nebo iontové plátování kovů. Fyzikální proces probíhá ve vakuu. Při napařování bývá čistý kov (nejčastěji titan Ti) odpařován pomocí elektrického oblouku. Tloušťky povlaků dosahují hodnot mezi 2 až 6 μm. Mezi výhody této metody patří hlavně možnost povlakování ostrých hran, jejichž poloměr zaoblení může být i menší než 20 μm, tvrdost povlaků nebo vnitřní tlakové pnutí zajišťující větší houževnatost břitu. K nevýhodám patří složitý vakuový systém nebo manipulace s povlakovanými předměty [10,18,21,23].

2.3 Cermety

Cermet je slinutý karbid, tvořený tvrdými částicemi na bázi titanu (Ti). Název vznikl spojením slov **cer**amic a **met**al. Podle toho se jedná o nástrojový materiál, jehož mechanické vlastnosti jsou kombinací keramiky a kovu. Keramika vykazuje velké hodnoty tvrdosti a houževnatost je charakteristická vlastnost kovu. Na rozdíl od slinutého karbidu, kdy je tvrdá složka tvořena karbidem wolframu (WC), hlavní tvrdou složkou v cermetu je karbid titanu (TiC), dále také karbonitrid titanu (TiCN) nebo nitrid titanu (TiN). V praxi jsou cermety považovány jako slinuté karbidy, které jsou zhotovené namísto karbidu wolframu (WC) právě na bázi titanu (Ti). Základním pojivem je nikl (Ni), ke kterému se často přidává kobalt (Co). Pro zvýšení pevnosti pojiva je přidáván molybden (Mo). Pro zvýšení smáčivosti nebo houževnatosti cermetu se také používá namísto kobaltu (Co) chrom (Cr). Právě tyto přidávání kovů do struktury cermetu vedlo k jejich vývoji zejména v oblasti houževnatosti [2,21,23,27].

Vlastnosti cermetů, jejich výhody a nevýhody [5,23]:

- Nízká měrná hmotnost (ve většině případů neobsahují těžké karbidy wolframu),
- výhodou je vysoká tvrdost i za vysokých teplot a chemická stabilita a odolnost proti oxidaci,
- menší tendence k ulpívání materiálu obrobku na břit (tvorba nárůstku)
- nevýhodou nízká houževnatost (oproti slinutým karbidům).

Následující tab. 2.3 popisuje vliv přísadových prvků na vlastnosti cermetů, kdy se podle druhu obráběného materiálu volí vhodné strukturní složení cermetové destičky.

Tab. 2.3 Vliv přísadových prvků na vlastnosti cermetu – podle [27].

Přísadové prvky cermetu	Vlastnost
TiC	Tvrdost
TiN	Stabilizace růstu zrna, odolnost proti opotřebení
(Ta, Nb)C	Tvrdost za vysokých teplot, odolnost proti teplotním šokům
Co/Ni	Houževnatost
Mo ₂ C/WC	Slinovací aktivita

Oblasti použití cermetů jsou především v operacích dokončovacího obrábění korozivzdorných ocelí, kdy lze užít vysokých řezných rychlostí, obrábění litiny, nízkouhlíkových a feritických ocelí. Pomocí nástrojů z cermetu lze zvýšit produktivitu i díky kvalitní výsledné drsnosti povrchu. V řezném procesu je doporučeno neužívat velkých hodnot šířky záběru ostří a vysokého posuvu [23,28].

Povlakování cermetů

Z důvodu požadavků na prodloužení trvanlivosti břitů nebo pro zvýšení řezných rychlostí mohou být cermety povlakovány. Pro tyto účely se používá především metod CVD a PVD. Tloušťka povlaku se pohybuje v rozmezí od 2 až do 15 μm . Vyměnitelné břitové destičky mohou mít i vícero povlaků. Pro povlakování cermetů je vhodnější metoda PVD. U metod CVD byly zaznamenány jemné trhlinky v substrátu [27].

2.4 Řezná keramika

Keramika je označována za převážně krystalický materiál. Hlavní složku tvoří anorganické nekovové sloučeniny. Keramiku lze rozdělit na dva základní typy, a to na bázi oxidu hlinitého Al₂O₃ (oxidická) a na bázi nitridu křemíku Si₃N₄ (neoxidická). Všechny tyto druhy mohou být dále vyztuženy pomocí tenkých vláken submikronového průměru (whiskerů), které podstatně zvyšují řezné vlastnosti. Jednotlivé vlastnosti lze kombinovat podle použití výběrem vhodného typu řezné keramiky [2,21,29].

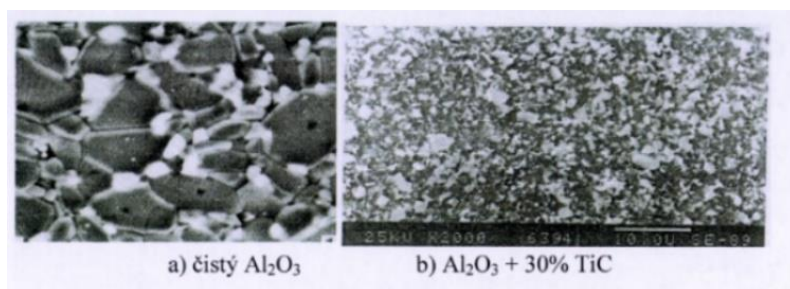
Pro řeznou keramiku je charakteristické [2,18,29]:

- Nízká měrná hmotnost,
- vysoká tvrdost za tepla,
- chemická stálost, chemicky nereagují s materiálem obrobku,
- tepelná odolnost,
- zaručující dlouhá trvanlivost i řezivost břitů i při vyšších řezných rychlostech,
- ekologická nezávadnost,
- nízká pořizovací cena,
- odolnost proti korozi.

Ve struktuře a složení mají významnou roli na vlastnosti řezné keramiky jednotlivá zrna, kdy při výrobě je cílem snaha o co nejmenší možnou velikost zrn (nad 10 μm již nepřijatelné) a vytvoření homogenní struktury [30].

Oxidická keramika

Keramiku na bázi oxidu hlinitého Al_2O_3 můžeme rozdělit na čistou (99,5 % Al_2O_3), směsnou ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{CoO}$) a vyztuženou ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2 + \text{TiC}$). Oxid hlinitý Al_2O_3 patří k nejstabilnějším oxidům vykazující chemickou stálost a vysoké hodnoty pevnosti. Na rozdíl od použití diamantových nástrojů, má tento druh řezné keramiky také vysokou odolnost proti difuznímu opotřebení. Struktura oxidické čisté keramiky a s přísadou TiC je na obr. 2.5 [2,21]. Směsná oxidická keramika s obsahem 15 až 20 % ZrO_2 vykazuje vyšší houževnatost a pevnost oproti čisté keramice. Použití přísad TiC nebo TiN umožňuje vyšší odolnost proti tepelným rázům a zabezpečují stabilitu mechanických vlastností za vyšších teplot. Výhodné je použití přísady TiC pro soustružení kalených ocelí a tvrzené litiny. Vyztužená keramika je zpevněná monokrystaly křemíku SiC (známé také pod názvem whisker). Vlákná karbidu křemíku SiC mají průměr 0,1 až 1 μm a brání v základní matici šíření mikrotrhlin. Díky tomuto vyztužení vykazuje nástroj z keramiky vysoké houževnatosti a pevnosti v tahu. Podíl whiskeru v řezném materiálu se pohybuje okolo 30 % [2,29,30].



Obr. 2.5 Struktura oxidické keramiky: a) čistý Al_2O_3 , b) $\text{Al}_2\text{O}_3 + 30\% \text{TiC}$ [27].

Neoxidická keramika

Neoxidická řezná keramika na bázi nitridu křemíku Si_3N_4 vykazuje vyšší houževnatost. Její využití je aplikováno zejména v obrábění šedé litiny, žáruvzdorné slitiny a kalené oceli nebo pro přerušované řezy. Kvůli její afinitě k železu a kyslíku dochází k rychlému otupení [2,30].

Podle složení přísad se nitridická řezná keramika dělí na [2]:

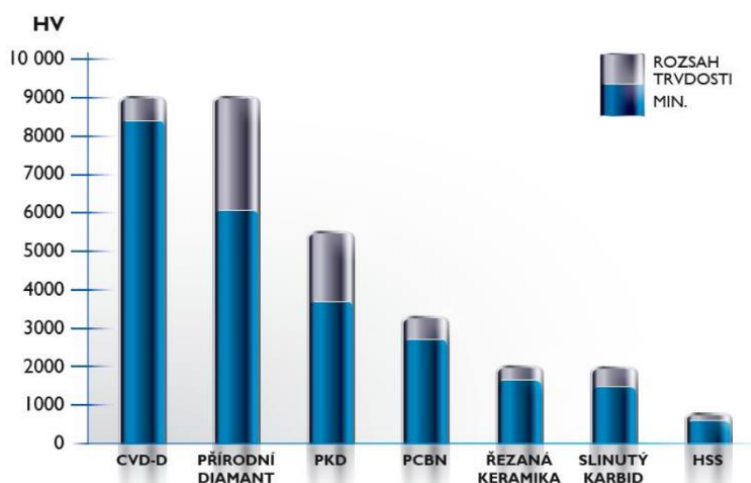
- Si_3N_4 s přísadou TiN ,
- Si_3N_4 zpevněný SiC vlákny (whiskery).

Ve srovnání s oxidickou keramikou vykazuje vyšší houževnatost a pevnost v ohybu, naopak je ale méně chemicky stabilní a odolnější proti opotřebení [30].

2.5 Kubický nitrid boru

Kubický nitrid boru lze zahrnout společně s polykrystalickým diamantem do skupiny supertvrdých řezných materiálů. Česká zkratka bývá pod označením KNB nebo PKNB (polykrystalický), v angličtině se můžeme setkat s varianty označení CBN nebo c-BN. Hlavním charakteristickým znakem kubického nitridu boru je jeho tvrdost, kterou překoná už jen diamant. Na obr. 2.6 je porovnání tvrdosti s ostatními řeznými materiály. Nicméně kubický nitrid boru v přírodní formě není vhodný pro výrobu nástrojů s definovanou geometrií břitů. Až za použití vysokých teplot (1350 $^{\circ}\text{C}$) a tlaků (5,5 GPa) se hexagonální mřížka nitridu boru i grafitu transformuje na kubickou mřížku. Krystaly kubického nitridu boru jsou velmi podobné

krystalům polykrystalického diamantu (PKD). Vlastnosti kubického nitridu boru jsou závislé na velikosti krystalu, obsahu a druhu pojiva (např. keramické pojivo) [2,5,21]. Vybrané fyzikální vlastnosti PKNB jsou znázorněny v tab. 2.4.



Obr. 2.6 Porovnání hodnot tvrdosti řezných materiálů [33].

Tab. 2.4 Vybrané fyzikální vlastnosti PKNB – podle [4].

Vlastnosti PKNB	
Měrná hmotnost	3,5 – 4,35 g·cm ⁻³
Tvrdost	2700 – 3500 HV
Pevnost v tahu	590 – 800 MPa
Pevnost v tlaku	2,7 – 3,5 Gpa
Pevnost v ohybu	500 – 800 Mpa

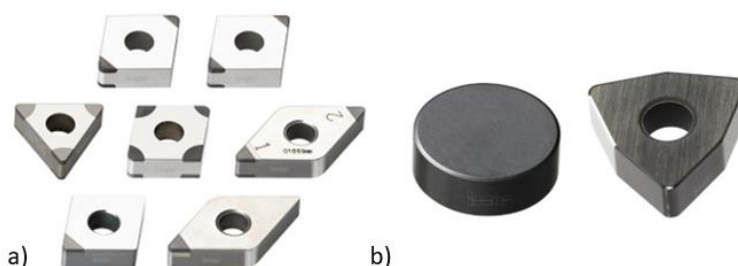
Pro aplikaci kubického nitridu boru je charakteristické [2,21,31,32]:

- Vysoká tvrdost při extrémních teplotách (i kolem 2000 °C),
- vysoká odolnost proti abrazivnímu opotřebení prodlužující životnost nástroje,
- křehkost, v porovnání s keramikou je houževnatější a tvrdší,
- vysoké řezné síly při obrábění (kvůli vysoké tvrdosti kalených materiálů),
- lze používat za vyšších hodnot řezných rychlostí,
- dobrá chemická stabilita a odolnost proti rázům,
- je doporučeno nepoužívat procesní kapaliny.

Vlastnosti nástroje z KNB výrazně ovlivňuje druh pojiva. Mezi nejčastější pojivo patří pojivo keramické, titanové (Ti) nebo TiN pojivo, popřípadě jejich kombinace. Polykrystalický kubický nitrid boru PKNB je vysoce výkonný řezný materiál obsahující pojivo nejčastěji na bázi hliníku (Al). Je fúzně slinován z kubického nitridu boru s Al pojivem. Výběr druhu vhodného pojiva má význam tam, kde dochází k chemické interakci s obráběným materiálem. Nízký obsah kubického nitridu boru v kombinaci s keramickým pojivem nalézá uplatnění v dokončovacích operacích kalených ocelí s malou hodnotou šířky záběru ostří a vyznačuje se větší odolností proti opotřebení. PKNB se středním obsahem zrn v substrátu je vhodný pro přerušované řezy. Vysoký obsah PKNB zajišťuje větší houževnatost a otěruvzdornost a je vhodný pro obrábění tvrdých litin, odstředivě litých materiálů a žárovzodorných slitin [2,33,34].

Vyměnitelné břitové destičky z PKNB

Rozsah použití vyměnitelných břitových destiček z PKNB by měl být u materiálů o tvrdosti vyšší než 48 HRC, jinak dojde ke značnému opotřebení břitu. Díky aplikačním možnostem obrábění nad 48 HRC (až do 65 HRC při řezné rychlosti až $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$) jsou tyto vyměnitelné destičky používány jako alternativa broušení. Vyměnitelné břitové destičky lze všeobecně rozdělit na monolitní a s pájenou vrstvou PKNB (viz obr. 2.7). Monolitní břitové destičky nacházejí uplatnění ve vysoce výkonných operacích soustružení. U břitové destičky s pájenou vrstvou PKNB je základem karbidová destička, na které je s pomocí pájené vrstvy v rozích uchycena vrstva PKNB. Při výběru tvaru břitové destičky je doporučeno použití co největšího poloměru zaoblení z důvodu tvrdosti a křehkosti PKNB materiálu [2,21,31,32].

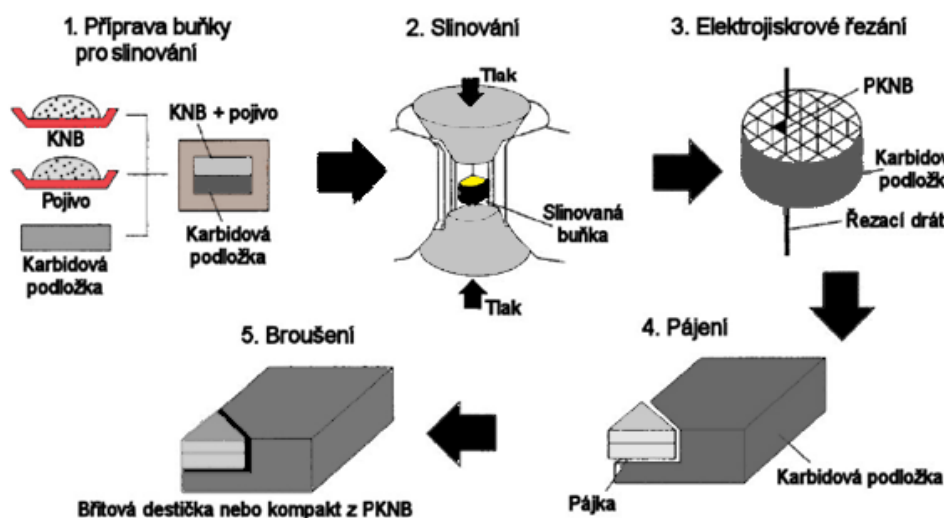


Obr. 2.7 Vyměnitelné břitové destičky z PKNB: a) s pájenou vrstvou, b) monolitní [31].

Možnosti způsobu upnutí vyměnitelných břitových destiček z PKNB do držáku jsou znázorněny v kapitole 1.7.1 na obr. 1.14.

Princip postupu výroby vyměnitelných břitových destiček z PKNB (který je totožný s postupem výroby pro diamantové vyměnitelné břitové destičky) je na obr. 2.8 a skládá se z následujících operací [5,22]:

- Výroba monokrystalů KNB,
- příprava buňky pro slinování,
- proces slinování,
- řezání tělesa na jednotlivé segmenty požadovaného tvaru,
- pájení segmentu (roubíku) na podložku ze slinutého karbidu (vyměnitelná břitová destička),
- dokončení broušením, či honováním funkčních ploch břitu.



Obr. 2.8 Princip výroby PKNB vyměnitelné břitové destičky [5].

Závěrem lze konstatovat, že podle výše uvedených vlastností PKNB je oblast jeho použití vhodná zejména při obrábění kalených ocelí v rozmezí tvrdosti od 48 až do 65 HRC (při obrábění ocelí o nižší tvrdosti je to neekonomické z důvodů ceny pořízení destičky), v oblastech nad 55 HRC je nástroj z PKNB jediným, kterým lze soustružit kalené oceli. Další použití je v obrábění bílých a šedých litin, vysoce legovaných niklových slitin, či slinutých karbidů [13,23,32].

2.6 Polykrystalický diamant

Přírodní monokrystalický diamant je nejtvrdším známým materiálem. Diamanty se dělí na přírodní a syntetické. Průmyslový diamant je vyroben z velmi čistého grafitu, který má v počátku hexagonální mřížku. V oblasti řezných materiálů se používá syntetický polykrystalický diamant (PKD). Polykrystalické diamanty vznikají obdobně jako PKNB fúzním slinutím diamantového prášku s pojivem, kterým je nejčastěji kobalt (Co) na podpurném nosiči ze slinutého karbidu (vyměnitelné břitové destičky). Během toho se za působení vysokého tlaku (až 6 GPa) a teploty (1350 °C) změní výše uvedená hexagonální mřížka na mřížku kubickou. Vlivem deformace mřížky dojde ke vzniku vnitřních napětí, které mají za následek zvýšenou hodnotu tvrdosti vyrobeného diamantu. Tloušťka diamantové vrstvy bývá v rozmezí od 0,5 do 1,5 mm [2,5,27,33]. Vybrané fyzikální vlastnosti jsou v tab. 2.5.

Tab. 2.4 Vybrané fyzikální vlastnosti PKNB – podle [4].

Vlastnosti PKD	
Měrná hmotnost	3,4 – 4,5 g·cm ⁻³
Tvrdost	5000 – 8000 HV
Pevnost v tahu	780 – 910 MPa
Pevnost v tlaku	4,2 – 8,0 GPa
Pevnost v ohybu	1200 – 1700 Mpa

Pro polykrystalický diamant je charakteristické [2,11,17,33]:

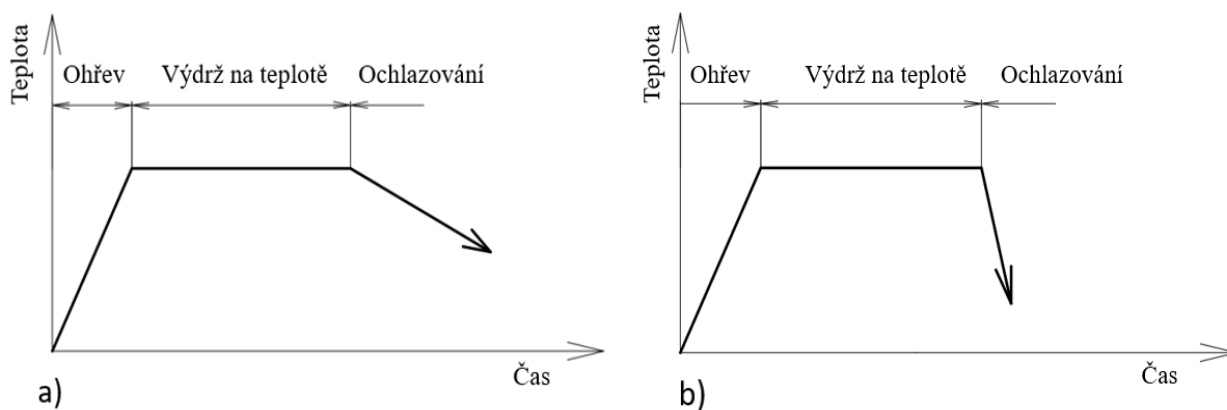
- Teploty v místě řezání nesmí být větší než 600 °C,
- nepoužívá se pro obrábění železných materiálů,
- nevhodný pro obrábění houževnatých materiálů s vysokou pevností,
- vysoké řezné rychlosti (až 3000 m·min⁻¹, standardně v rozmezí 100 – 500 m·min⁻¹),
- díky své vysoké tvrdosti je křehký a náchylný na opotřebení ve vyšších teplotách,
- příznivá odolnost proti otěru, ale horší chemická stabilita,
- břity dosahují mimořádně velké trvanlivosti oproti slinutým karbidům (až stonásobně),
- nástroje z PKD mají řeznou hranu s definovanou geometrií.

Nástroje z PKD nachází uplatnění zejména v obrábění neželezných kovů, jako jsou hliníkové slitiny s vysokým obsahem křemíku a měděné slitiny, mosazi a bronzy. Dalším odvětvím mohou být nekovové materiály, například grafit, skleněné lamináty, umělé pryskyřice nebo kompozitní materiály. Nicméně použití nástrojů z PKD je omezeno hlavně na kovové materiály obsahující slitiny železa (Fe), manganu (Mn), niklu (Ni) nebo chromu (Cr) a na karbidotvorné prvky, například wolfram (W), které během vysoké teploty reagují s diamantem. Problémem bývá vysoká závislost chemické afinity mezi nástrojem a obráběným materiálem, kdy uhlík začne difundovat z krystalografické mřížky diamantu do obráběného materiálu [2,11,17,33].

3 CHARAKTERISTIKA TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ OCELI

Pod pojmem tepelné zpracování oceli lze rozumět proces, kdy se záměrně využívá fázových a strukturních přeměn ve stavu tuhém ke změně struktury. Pomocí této přeměny získá ocel požadované mechanické, strukturní, technologické nebo jiné vlastnosti. Při tepelném zpracování tedy nedochází ke změnám tvaru součásti, eventuálně je tato změna v tomto případě nežádoucí. Jeho průběh pak charakterizuje cílené a řízené změny teploty, změny chemického složení vrstev na povrchu a teploty. Během tepelného zpracování jsou brány v úvahu i konkrétní tvary a velikosti součástí a jejich požadavky na výslednou kvalitu povrchu, rozměrová a tvarová stabilita. Samotný proces vyžaduje značnou pozornost, neboť při špatně zvoleném technologickém postupu tepelného zpracování může docházet například ke zvýšeným hodnotám vnitřního pnutí až na úroveň, která způsobí plastické deformace součásti vedoucí ke vzniku defektů (trhlin), dále finanční náklady na tepelné zpracování jsou spojeny především s velkou spotřebou energie, což vyžaduje pečlivé posouzení o vhodnosti a o použití dané metody. Naopak dobře volené a provedené tepelné zpracování umožňuje vyrábět strojní součásti výkonnější, lehčí a trvanlivější. Hospodárněji se tak může využít kov a jeho drahé legující přísady. Další výhodou je i možnost zjednodušení technologických postupů výroby, což může být do určité míry jako kompenzace za energetickou náročnost [35,36].

Již výše zmíněnou podstatou tepelného zpracování je ohřev materiálu. Tepelný cyklus se skládá z třech základních kroků. V prvním kroku se materiál ohřeje na požadovanou teplotu (je různá podle druhu tepelného zpracování a podle druhu materiálu), následně probíhá tzv. výdrž na teplotě v řádu i několika hodin. Posledním krokem je ochlazování, které je klíčové pro vznik výsledné struktury materiálu. Ochlazování může probíhat pomalu, což je charakteristické při žíhání, nebo rychle, čehož se využívá během kalení. Průběh tepelného zpracování je schematicky znázorněn na obr. 3.1 [37].



Obr. 3.1 Průběh tepelného zpracování: a) pomalé ochlazování, b) rychlé ochlazování – podle [37].

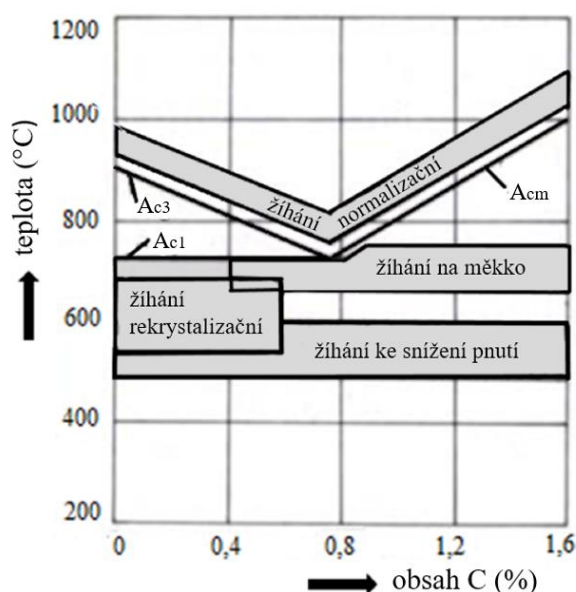
K ohřevu se využívá průmyslových pecí. Tyto pece mohou být komorové, vozové nebo šachtové na bázi vzdušné atmosféry (elektrické pece) nebo na bázi zplodinového hoření (pece plynové). Během ohřevu je důležité, aby byly potlačeny nežádoucí jevy, například vznik okujů (kyslík v atmosféře pece oxiduje). K odstranění těchto jevů lze použít různé druhy nátěrů nebo použití ochranné atmosféry s inertními plyny, jako jsou dusík (N) a argon (Ar) [35]. Výdrž na teplotě a způsob ochlazování pak závisí na způsobu tepelného zpracování. V tab. 3.1 jsou znázorněny hlavní způsoby tepelného zpracování. V této kapitole budou jednotlivě rozebrány vybrané základní metody tepelného zpracování se zaměřením na metodu kalení.

Tab. 3.1 Způsoby tepelného zpracování – podle [35].

Tepelné zpracování	Způsob a metoda	
Žihání	bez překrystalizace	na měkko na snížení vnitřního pnutí rekrytalizační
	s překrystalizací	homogenizační normalizační izotermické kombinované
Kalení	martenzitické	do studené lázně (přímé, lomené, přerušované) do teplé lázně (termální) se zmrazováním povrchové kalení
	bainitické	do studené lázně do teplé lázně (izotermické zušlechťování)
Popouštění	při nízkých teplotách	napouštění
	při vysokých teplotách	anizotermické zušlechťování
Vytvoření tvrdých povrchových vrstev	sycení povrchu nekovy	cementování nitridování nitrocementování karbonitridování

3.1 Žihání

Žihání je způsob tepelného zpracování, pro který jsou charakteristické relativně malé ochlazovací rychlosti, které nejsou vyšší než rychlost ochlazování na vzduchu. Samotný proces bývá v technologickém postupu zařazen ještě před obráběcí operací. Cílem žihání je vytvoření homogenní a jemnozrnné struktury pro lepší technologické vlastnosti během opracování kovů, zejména z hlediska tvárnosti, houževnatosti nebo obrobiteľnosti. Podle výše teploty dělíme žihání na žihání bez překrystalizace a s překrystalizací. Jednotlivé druhy žihání jsou rozděleny v rovnovážném diagramu Fe-Fe₃C podle teplot na obr. 3.2 [35,39].

Obr. 3.2 Oblasti žihacích teplot pro používané metody v diagramu Fe-Fe₃C – podle [39].

3.1.1 Žihání bez překrystalizace

Žihání bez překrystalizace je charakteristické tím, že se nemění fázové složení oceli. V praxi to znamená, že se žihá pod rekrytalizační teplotou A_{c1} (viz obr 3.2). Tato hodnota přibližně odpovídá teplotě $727\text{ }^{\circ}\text{C}$. Doba výdrži na teplotě je 1 hodina na 20 mm tloušťky materiálu. Mezi základní metody žihání bez překrystalizace patří žihání na měkko, ke snížení vnitřního pnutí nebo rekrytalizační žihání [38].

Žihání na měkko

Při žihání na měkko dochází ke změně lamelárního perlitu na perlit globulární (sferoidizace) perlitu. Tento proces se uskutečňuje za teplot v blízkosti A_{c1} , konkrétně $680\text{ až }720\text{ }^{\circ}\text{C}$. Účelem žihání na měkko je zlepšení obrobitelnosti, tvárnosti a snížení tvrdosti materiálu. Obvykle se tato metoda používá před samotným obráběcím procesem [37,38].

Žihání ke snížení vnitřního pnutí

Žihací teploty jsou v rozmezí $500\text{ až }650\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy je nízká hodnota meze kluzu a tím i hodnoty tahových napětí. Ochlazování bývá pomalé až do teplot $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, poté se chladí pouze vzduchem. Využití je především po tvářecích a svařecích operacích, jako důsledek předcházejícího zpracování (například místního ohřevu, kdy bývá nestejnoměrné ochlazování součásti, apod.). Doba výdrži na teplotě se pohybuje v rozmezí 1 až 2 hodin [36,38].

Žihání rekrytalizační

Účelem tohoto druhu žihání je obnovení tvárných vlastností oceli po tváření za studena. Rekrytalizační žihání se skládá z ohřevu na teplotu $550\text{ až }700\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v porovnání s ostatními metody je doba výdrži na teplotě nepatrně kratší, přibližně 1 hodinu. Výše teploty závisí na stupni deformace, ale nesmí překročit hodnotu teploty A_{c1} , jinak dojde k překrystalizaci [39].

3.1.2 Žihání s překrystalizací

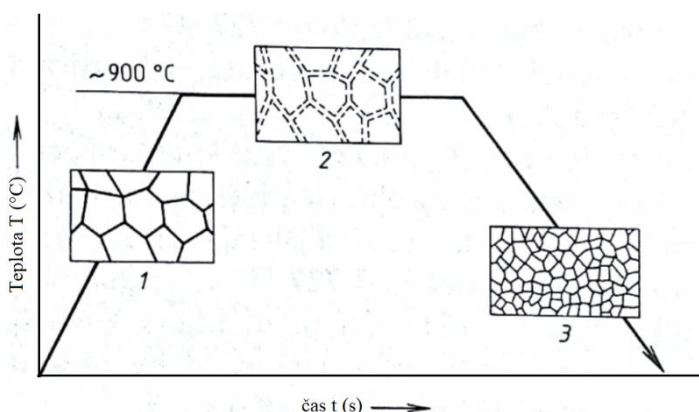
Během žihání s překrystalizací, tj. v oblastech nad teplotou A_{c1} , dochází k částečné nebo téměř úplné přeměně původní feriticko – cementitické struktury na austenit. Cílem je odstranění strukturní nestejnoměrnosti. Mezi druhy metod žihání s překrystalizací patří homogenizační žihání, normalizační žihání, izotermické žihání a kombinovaná žihání [35].

Homogenizační žihání

Při homogenizačním žihání dochází ke zmenšení chemické heterogenity způsobené například během tuhnutí odlitků nebo ingotů. Vyrovnání rozdílů chemického složení difuzními pochody probíhají za teplot $1100\text{ až }1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu výdrži na teplotě 5 až 15 hodin v závislosti na hrubozrnné struktuře oceli. Po homogenizačním žihání bývá ocel následně tepelně zpracována, například tvářením za tepla nebo normalizačním žiháním, z důvodu hrubnutí austenitických zrn ve struktuře [35,38].

Normalizační žihání

Normalizační žihání odstraňuje nestejnoměrnosti, které vzniknou během mechanického zpracování. Jeho použití je vhodné pro uhlíkové a nízkolegované oceli. Touto metodou žihání dochází k zjemnění austenitického zrna. Ohřev probíhá za teplot okolo $30\text{ až }50\text{ }^{\circ}\text{C}$ nad teplotou A_{c3} (viz obr. 3.2), což odpovídá přibližně $900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výsledná hrubost struktury je pak závislá na rychlosti ochlazování (rozpad austenitu) [37,39]. Na obr. 3.3 je znázorněno normalizační žihání, kdy je hrubozrnná struktura oceli nejprve ohřata na teplotu přibližně $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně se začne měnit a během ochlazování vzniká nová zjemněná struktura.



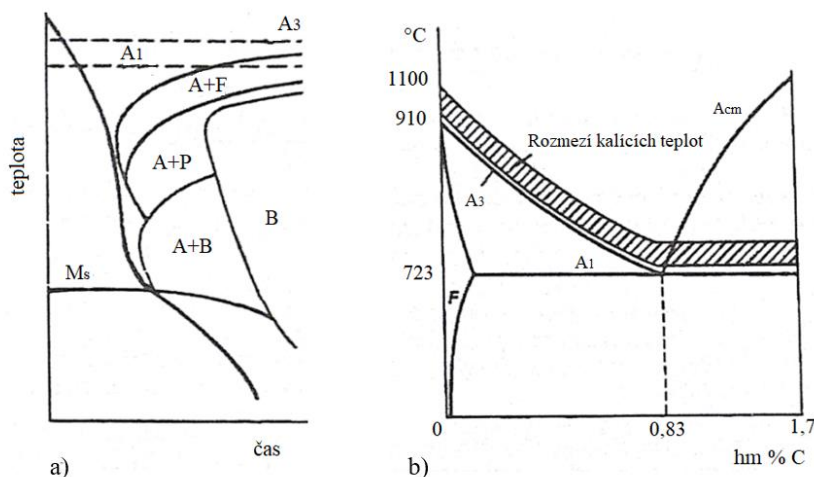
Obr 3.3 Normalizační žíhání: hrubozrnná struktura (1), přeměna struktury (2), nová zjemněná struktura (3) – podle [37].

Izotermické žíhání

Postup spočívá v rychlém ochlazení austenitizované oceli na teplotu perlitické přeměny, která činí 600 až 700 °C. Po ukončení přeměny se následně ocel ochlazuje pouze na vzduchu. Používá se pro žíhání ložiskových ocelí (14 109 a 14 209). Izotermické žíhání může být použito i k žíhání na měkko. Nevýhodou je úzká škála použití, výhradně u menších součástí, kde je možná rychlá změna teploty [39].

3.2 Kalení

Cílem kalení v technologických procesech výroby je zejména zvýšení tvrdosti daných součástí, kdy je vytvořena částečná nebo zcela nerovnovážná struktura oceli nebo zvýšení pevnosti materiálu při vhodné houževnatosti. Tyto vlastnosti se získávají různými metodami kalení. Proces kalení probíhá tak, že je součást ohřata na tzv. austenitizační teplotu, která je závislá na množství obsaženého uhlíku v oceli. U podeutektoidních ocelí se jedná o 30 až 50 °C nad teplotu A_{c3} . Pro nadeutektoidní oceli je teplota ohřevu nižší, a to přibližně 30 až 50 °C nad teplotou A_{c1} . Po ohřevu a výdrži na teplotě následuje prudké ochlazení, kdy nedojde ke všem fázovým přeměnám. Vzniká tak struktura kalených ocelí, která se nazývá martenzitická nebo bainitická. Pro určení dějů, které nastávají během rychlého ochlazování slouží ARA diagramy příslušných ocelí (viz obr. 3.4a). Pro stanovení austenitizačních teplot se využívá diagramu Fe–C. Pásmo kalících teplot jsou znázorněna na obr. 3.4b [36,40].



Obr. 3.4 Kalení: a) průběh ochlazování podeutektoidních ocelí, b) pásmo kalících teplot – podle [41].

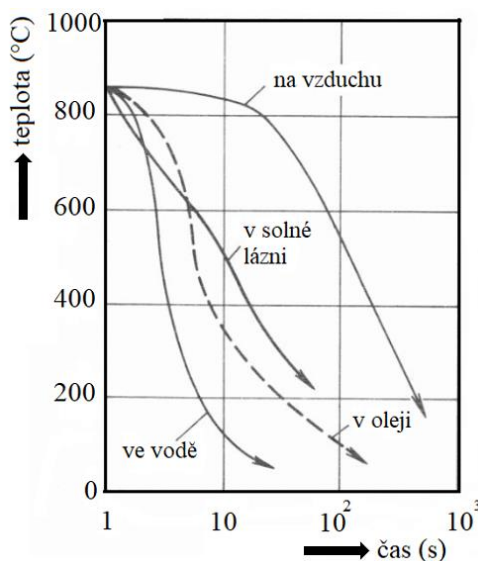
Z obr. 3.4a lze vyčíst ideální průběh ochlazování podeutektoidní oceli, kde písmeno A představuje austenit, F představuje ferit, P je perlit, B je struktura bainitická a M_s je tzv. martenzit start, kdy se začíná vytvářet martenzitická struktura. Jak již bylo zmíněno, rychlost ochlazování ovlivňuje výslednou strukturu oceli. V tomto případě nedochází ke všem fázovým přeměnám, nýbrž se vytvoří martenzitická struktura. Na obr. 3.4b je rozmezí kalících teplot dáno především hmotností ohřívané součásti, jejím chemickým složením a způsobem ohřevu. Pokud se překročí optimální kalící teplota nebo výdrž na kalící teplotě, dochází k růstu austenitického zrna a vytvoří se hrubé martenzitické jehlice, které po ochlazení vykazují nižší tvrdosti struktury a může docházet ke vzniku trhlin [41].

V souvislosti s tepelným zpracováním metodou kalení lze definovat následující pojmy [35,40]:

- Kalící teplota = jedná se o austenitizační teplotu, ze které probíhá samotný proces kalení,
- kalitelnost = schopnost oceli, jak moc se zvýší její tvrdost po kalení, závisí především na obsahu uhlíku, což má značný vliv na vytvoření martenzitické struktury,
- prokalitelnost = schopnost oceli dosažení požadované tvrdosti do určité hloubky součásti od jejího povrchu, na dostatečné prokalení má vliv zejména množství obsaženého uhlíku a legur v součásti, a také velikost austenitického zrna,
- zakalitelnost = míra tvrdosti oceli po zakalení součásti, kdy je maximální hodnota závislá na tvrdosti martenzitu, což ovlivňuje množství obsahu uhlíku v austenitu, pro kalitelnost a zakalitelnost platí, že jde o materiálové charakteristiky, které jsou kromě chemického složení oceli závislé právě na stavu austenitu před kalením.

Kalící prostředí

Mezi základní požadavky pro správný průběh procesu kalení patří volba kalícího prostředí. Tím bývá většinou kapalina nebo plyn. Mezi používané kapaliny se řadí zejména voda, olej a solná lázeň nebo různé kalící emulze. Mimo kapaliny lze dále použít chlazení vzduchem nebo za pomoci plynových látek, jako jsou dusík (N) nebo argon (Ar). Ochlazovací schopnost daného prostředí charakterizuje pojem rychlost ochlazování, která musí být vyšší než kritická rychlost. Nejčastějším kalícím prostředím je voda. Používá se zejména pro nelegované nebo nízkolegované oceli. Teplota vody se pohybuje okolo 20 °C. Oleje se mohou využívat i pro popouštění. Rychlost ochlazování je závislá na druhu oleje, nesmí se zapomínat, že olej je vysoce hořlavý. Proto jsou u něj vyžadována bezpečnostní opatření. Na obr. 3.5 je zobrazena závislost, jak kalící prostředí ovlivňuje změnu teploty za daný časový úsek [41,42].



Obr. 3.5 Závislost rychlosti ochlazování na teplotě do různých kalících prostředí – podle [39].

3.2.1 Způsoby kalení

Mezi základní rozdělení patří kalení martenzitické a bainitické. Aby byla ocel kalitelná, je potřeba, aby množství obsahovalo minimálně 0,35 % C. U martenzitické přeměny dochází k výraznému přechlazení austenitu za nízkých teplot, kdy již není možná difuze uhlíku, ani substitučních prvků. Výsledkem bezdifuzní přeměny je martenzit. Bainitická přeměna má prvky perlitické a martenzitické přeměny. Vyžaduje značný stupeň přechlazení austenitu jako martenzitická struktura. Z hlediska mikrostruktury se jedná o nelamelární směs feritu a karbidů [36,37]. Na obr. 3.6 jsou v diagramu popsány schémata průběhu martenzitického kalení.

Přímé kalení

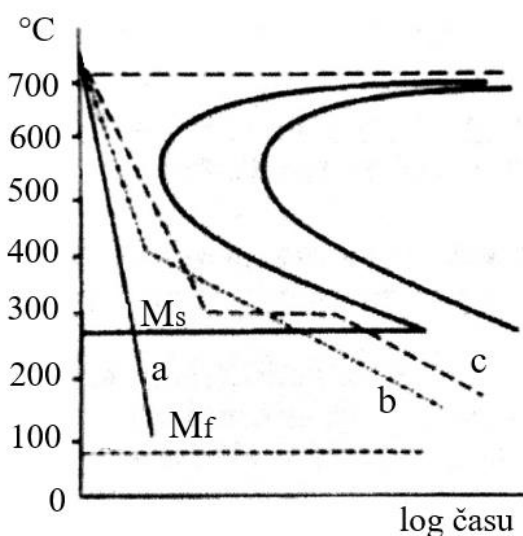
Jedná se o nejčastější metodu, přímé kalení na martenzit do studené lázně, která má teplotu nižší než je teplota M_s . Princip spočívá v ohřátí součásti na kalicí teplotu v kalicí lázni, kterou je voda nebo olej. Při použití této metody s ochlazováním vodou dochází k velice rychlému ochlazování, kdy je nebezpečí pnutí v materiálu součásti. Při použití oleje ochlazovací rychlost klesá, což může vést ke vzniku struktury bainitické, nicméně pokud je ochlazovací rychlost nadkritická, dojde ke vzniku martenzitu [41].

Termální kalení

Jelikož u přímého kalení dochází ke značnému pnutí díky vysoké rychlosti ochlazování (výsledkem fázová přeměna z austenitu na martenzit), účelem termálního kalení je tyto pnutí zmírnit. Principiálně se jedná o martenzitické kalení, kdy dochází k ochlazování rychlostí větší než kritickou až do bodu, kdy je teplota téměř na hodnotě počátku tvorby martenzitické struktury. V tomto bodě je zařazena výdrž na teplotě. Prodleva je taková, aby nedošlo k rozpadu austenitu na bainit. Jakmile se teplota v celém průřezu součásti vyrovná, pokračuje se v ochlazování na teplotu okolí (vzduchem, olejem) a dochází k martenzitické přeměně [36,40].

Lomené kalení

Princip lomeného (neboli přerušovaného) kalení spočívá v tom, že se součást po ohřátí na kalicí teplotu rychle ochladí (nejčastěji vodou) až těsně nad teplotu odpovídající M_s (300 až 400 °C), kdy se zabrání vzniku perlitické struktury, následně se součást přemístí do ochlazovacího prostředí s mírnějším průběhem (například olej nebo vzduch), kde dojde k přeměně na martenzit. Účelem této metody je snížení ochlazovací rychlosti během přeměny, snížení deformací a zabránění vzniku trhlin [35,40]



Obr. 3.6 ARA diagram pro eutektoidní ocel: a) přímé, b) lomené, c) termální kalení – podle [41].

Kalení se zmrazováním

Používá se u ocelí, jejichž teplota M_f je nižší než $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Jako chladicí prostředí se používá směs lihu a tuhého oxidu uhličitého nebo tekutý dusík. Princip spočívá v přenesení zakalené součásti do prostředí, kde teplota sahá pod bod mrazu. Tím se zmenší podíl zbytkového austenitu ve struktuře. Prodleva mezi zakalením a přenesením součásti do prostředí bod bodem mrazu by měla být co nejkratší, jinak dojde k zastavení tvorby martenzitické struktury [36].

Povrchové kalení

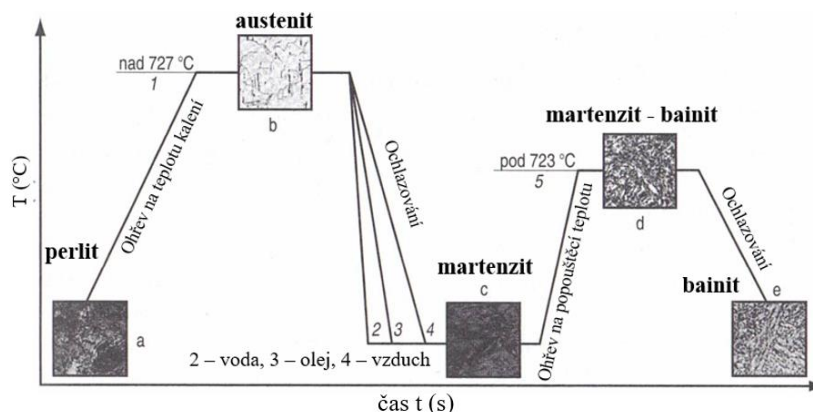
Součást se zakalí jen do určité hloubky, která bývá v rozmezí mezi 0,5 až 3 mm od povrchu a používá se u uhlíkových ocelí při snaze o dosažení vysoké tvrdosti na povrchu tak, aby jádro součásti neztratilo na houževnatosti a zůstalo měkké. Přejít zakaleného povrchu do měkčího jádra součásti by měl být pozvolný. Důležitá je výchozí struktura, která se normalizačně žíhá k získání jemnější a homogenní struktury. Ohřev součásti je intenzivní. Provádí se indukčně v induktoru, plamenem z hořáku, ponorem do roztavené lázně nebo laserovým paprskem [41].

Izotermické zušlechťování

Jedná se o bainitické kalení, což znamená, že po skončení přeměny austenitu vzniká struktura bainitická, která má i při vysokých hodnotách pevnosti vyšší houževnatost. Princip této metody spočívá v rychlém přenesení z kalící teploty do termální lázně obsahující roztavené soli, kde je teplota okolo $300\text{ až }400\text{ }^{\circ}\text{C}$ odpovídající bainitické přeměně. Následuje výdrž na teplotě do skončení přeměny (austenit na bainit) a poté se součást ochladí na teplotu okolí. Kalící teploty se stanovují na základě křivek diagramů IRA [40].

3.3 Popouštění

Popouštění je proces, následující bezprostředně po zakalení součásti. Skládá se z ohřevu kaleného předmětu na určenou teplotu odpovídající teplotě A_{c1} a následné výdrži. Po výdrži na teplotě se součást opět ochladí. Díky tomuto postupu dochází k fázové přeměně, kdy se martenzit a zbytkový austenit začíná rozpadat a dochází k relaxaci vnitřních pnutí a zmírnění tvrdosti. Tento děj probíhá v intervalu teplot od $300\text{ do }450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se zvyšující se popouštěcí teplotou se stává ocel měkčí. Průběh kalení a popouštění oceli je znázorněn na obr. 3.7. Popouštění lze rozdělit podle výše popouštěcí teploty, která má zásadní vliv na strukturu, na popouštění při nízkých (napouštění) a při vysokých teplotách (anizotermické zušlechťování). Popouštění při nízkých teplotách bývá do teplot přibližně $350\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy je cílem snížení vnitřních pnutí po kalení a zmenšení podílu zbytkového austenitu, což vede ke zlepšení houževnatosti. Cílem při popouštění za vysokých teplot je získání lepších mechanických vlastností. S rostoucí popouštěcí teplotou klesá tvrdost a pevnost a zvyšuje se plasticita s houževnatostí [36,38,42].



Obr. 3.6 Průběh kalení a popouštění oceli 0,765 % C s metalografickými výbrusy – podle [37].

4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část diplomové práce bude řešit problematiku obrábění oceli třídy 14, konkrétně 14 109, která je zakalena na tvrdost 62 – 64 HRC. Ocel se používá pro výrobu valivých elementů ložisek a jejich komponent. Cílem práce je analýza podélného soustružení v dokončovacích operacích výše uvedeného materiálu za použití nástrojů z polykrystalického kubického nitridu boru (PKNB). Analýza se bude skládat z měření a vyhodnocení silového zatížení pomocí dynamometru Kistler. Dále bude měřena jakost povrchu pomocí drsnoměru Taylor Hobson. Obě analýzy budou testovány za použití různých řezných podmínek, konkrétně budou nastaveny tři hodnoty řezných rychlostí v_c , dvě kombinace posuvu na otáčku f a šířky záběru ostří a_p za účelem zjištění optimálních kombinací výše uvedených řezných podmínek.

V první části experimentální práce je rozebrána identifikace obráběcího procesu skládající se z popisu soustruženého materiálu, obráběcího stroje, vyměnitelné břitové destičky a držáku nástroje, řezných podmínek a použitých měřicích přístrojů.

V druhé části experimentu budou vyhodnocena data získaná z dynamometru Kistler a drsnoměru Taylor Hobson. Na základě těchto dat pak vzejde doporučení o použití vyměnitelné břitové destičky (VBD) a vhodných řezných podmínkách pro dokončovací operaci soustružení daného zakaleného materiálu.

Testování probíhalo v prostorách dílen ÚST FSI VUT v Brně.

4.1 Obráběný materiál

Obráběným materiálem je ocel třídy 14, konkrétně 14 109 dle normy ČSN 41 4109. Ekvivalentní označení oceli je 100Cr6. Jedná se o tzv. chromovou ocel, která nachází využití pro výrobu ložiskových elementů kuličkových a valivých ložisek. Technická norma uvádí dobrou tvárnost za tepla a obrobitelnost. V tab. 4.1 a tab. 4.2 jsou znázorněny chemické a mechanické vlastnosti oceli. V tab. 4.3 jsou technologické vlastnosti oceli.

Tab. 4.1 Chemické složení oceli 14 109 – podle [44].

Ocel 14 109								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Ni+Cu	P	S
Chemické složení [%]	0,90 až 1,10	0,30 až 0,50	0,15 až 0,35	1,30 až 1,65	max. 0,30	max. 0,50	max. 0,027	max. 0,030
Dovolené úchytky chemického složení [%]	-	-0,05 + 0,10	-0,00 + 0,05	- 0,05 +0,10	-	-	-	-

Tab. 4.2 Mechanické vlastnosti materiálu ve stavu žíhaném na měkko – podle [44].

Mechanické vlastnosti oceli 14 109				
Mez kluzu Re [MPa]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Tažnost A [%]	Kontrakce Z [%]	Tvrdost [HB]
441	608 až 726	18	35	max. 210

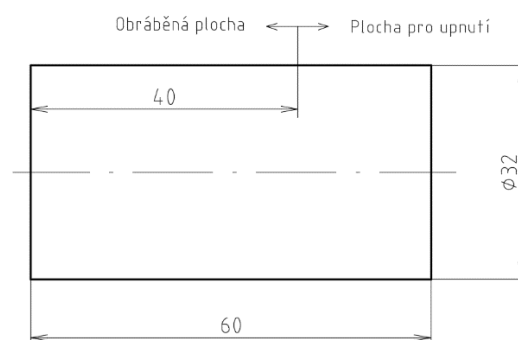
Tab. 4.3 Technologické vlastnosti oceli – podle [44].

Technologické vlastnosti oceli 14 109			
Nejnižší tvrdost po kalení do oleje [HRC]	Mikrostruktura	Teplota kalení s ochlazením ve vodě [°C]	Teplota kalení s ochlazením v oleji [°C]
62	zrnitý perlit, zbytky lamelárního perlitu do 10 %	790 až 820	820 až 840

Dodaný materiál ve formě polotovaru je na obr. 4.1. Pro účely experimentu z hlediska dokončovacího obrábění byla nejprve odebrána hrubováním vrstva materiálu. Průběh testování a měření probíhal až poté. Bylo testováno celkem 12 ks tohoto polotovaru. Průměr polotovaru je 32 mm a délka 60 mm. Polotovaz byl upnut do univerzálního tříčelistového sklíčidla. Soustružená dráha činila 40 mm, tudíž byl upnut tak, aby byl zajištěn doraz na této hodnotě.



a)



b)

Obr. 4.1 Kalená ocel 14 109: a) dodaný materiál, b) rozměry polotovaru.

4.2 Obráběcí stroj

Jedná se o univerzální hrotový soustruh SV18 RD. Tento soustruh vyrábí a dodává firma TOS. Soustruh je vhodný zejména pro malosériovou a kusovou výrobu. Využívá se především pro výrobu rotačních součástí. Hrotový soustruh je vybaven plynulou regulací otáček vřetena pro zajištění konstantní řezné rychlosti během soustružení.

Technické parametry univerzálního hrotového soustruhu SV18 RD jsou znázorněny v tab. 4.4 na následující straně. Soustruh je součástí strojového parku ÚST FSI VUT v Brně (viz obr. 4.2), kde probíhalo veškeré měření a testování.

Tab. 4.4 Technické parametry soustruhu – podle [45].

Univerzální hrotový soustruh SV18 RD	
Oběžný průměr nad ložem [mm]	380
Oběžný průměr nad suportem [mm]	215
Maximální délka soustružení [mm]	1250
Maximální průměr soustružení [mm]	100
Průměr sklíčidla [mm]	200
Rozsah otáček vřetena [min^{-1}]	56 – 2800
Výkon hlavního motoru při $n = 2800 \text{ min}^{-1}$ [kW]	10
Maximální krouticí moment elektrovřetena [Nm]	200
Největší váha obrobku [kg]	300
Rozměry: délka x šířka [mm]	2900 x 950
Hmotnost [kg]	2000

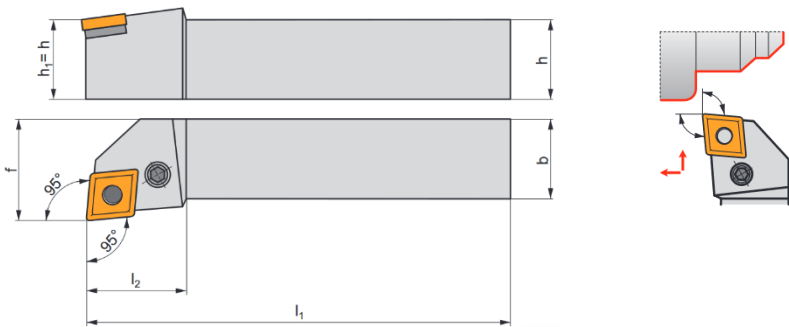


Obr. 4.2. Univerzální hrotový soustruh SV18 RD.

4.3 Použitý nástroj a VBD

Pro podélné soustružení byl zvolen nástroj, který společně s vyměnitelnými břitovými destičkami dodala firma Dormer Pramet s. r. o. Katalogové označení držáku nástroje je PCLNL 2525 M 12, podrobnější údaje jsou uvedeny v tab. 4.5.

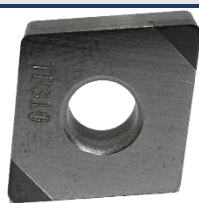
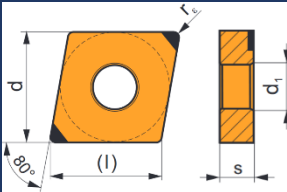
Tab. 4.5 Nástroj PCLNL 2525 M 12 – podle [46].

Nástroj PCLNL 2525 M 12						
						
Údaje	levý ¹⁾ nástroj pro vnější tvarové podélné a čelní soustružení, hrubování i dokončování					
$h = h_1$ [mm]	b [mm]	f [mm]	l_1 [mm]	l_2 [mm]	λ_s [°]	γ_o [°]
25	25	32	150	36,0	-6	-6

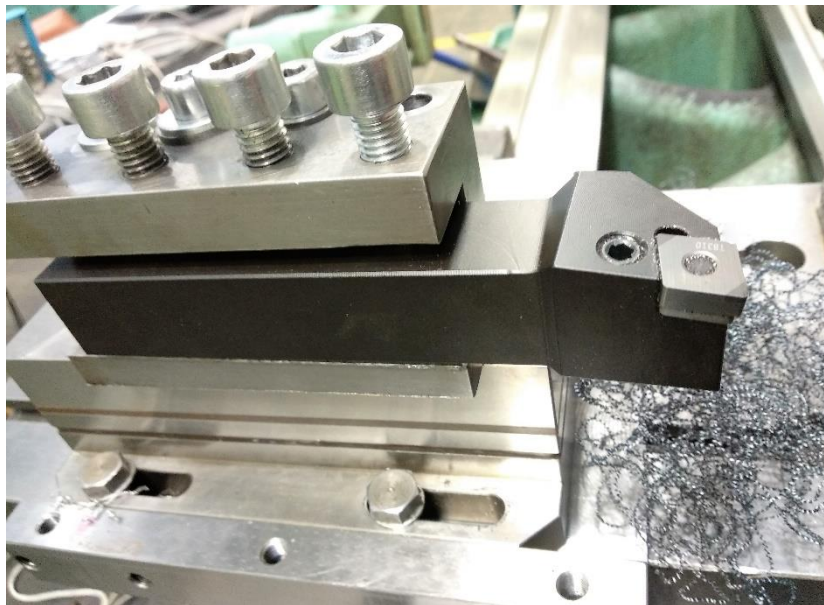
¹⁾Obrázek je ilustrační a zobrazuje nástroj s orientací směru řezu doprava, rozměry neovlivňuje. V experimentu je použit nástroj s levým směrem řezu.

Dále byly dodány a použity VBD s poloměrem zaoblení špičky $r_\epsilon = 0,8$ mm. Tyto VBD mají katalogové označení CNGA 120408S01020B. Jedná se o VBD, kde je použit materiál TB310, což je polykrystalický kubický nitrid boru (PKNB). V tab. 4.6 jsou uvedeny technické specifikace VBD a materiálu PKNB. VBD s označením CNGA mají nulový úhel hřbetu a jsou provedeny bez utvařeče třísky.

Tab. 4.6 Technické specifikace použitých VBD – podle [46].

Vyměnitelné břitové destičky CNGA						
	Označení VBD	Mat.	r_ϵ [mm]	a_p [mm]	f [mm]	v_c [m·min ⁻¹]
	CNGA 120408S01020B	TB310	0,8	0,1 – 2,7	0,02 – 0,20	100 – 200
	Rozměry VBD	d [mm]	d_1 [mm]	l [mm]	s [mm]	
		12,700	5,16	12,9	4,76	
Popis materiálu TB310	nižší hodnoty f , doporučení pro vyšší v_c , nepovlakovaná VBD, substrát na bázi PKNB, černá barva, negativní vlivy použití procesních kapalin					
Použití VBD	Kalené a zušlechtnuté oceli nad 50 HRC, ISO 513 skupina H (tab. 2.1).					

Na obr. 4.3 je znázorněn kompletní nástroj s držákem a použitou VBD s označením CNGA.



Obr. 4.3 Nástroj použitý během experimentu.

4.4 Řezné podmínky experimentu

Pro univerzální hrotový soustruh SV 18 RD a použité nástroje od společnosti Dormer Pramet s. r. o. bylo v rámci experimentálních zkoušek požadováno zvolit různé varianty řezných podmínek. Během podélného soustružení byly postupně nastavovány a měněny různé kombinace řezných rychlostí v_c , posuvu na otáčku f a šířky záběru ostří a_p . Tyto kombinace byly zaznamenány během měření řezných sil dynamometrem a na základě výsledných obrobků se měřila jakost povrchu. U měření jakosti povrchu je právě posuv na otáčku f zohledňován jako důležitý parametr pro výslednou jakost povrchu společně s poloměrem zaoblení špičky r_e . Výsledné hodnoty řezných sil jsou ovlivňovány především změnou průřezu třísky a výše uvedenými řeznými podmínkami, z toho důvodu je vhodné porovnávat složky sil během různých variant nastavení řezných podmínek na stroji.

V tab. 4.7 jsou uvedeny požadované vstupní hodnoty řezných podmínek.

Z důvodu vlastností zvolené VBD nebude během experimentu použito procesní kapaliný.

Tab. 4.7 Vstupní hodnoty řezných podmínek během experimentu.

Řezné podmínky			
Parametr	Označení parametru	Hodnota parametru	Jednotka
Průměr obrobku	D	32	[mm]
Řezná rychlost	v_c	130	[m·min ⁻¹]
		155	
		180	
Posuv na otáčku	f	0,05	[mm]
		0,1	
Šířka záběru ostří	a_p	0,2	[mm]
		0,35	

4.5 Použité měřicí zařízení a charakteristika měřených veličin

V průběhu testování v útrokách dílen ÚST FSI VUT v Brně byly použity měřicí přístroje pro měření silového působení a pro měření jakosti povrchu.

4.5.1 Měření řezných sil pomocí dynamometru Kistler

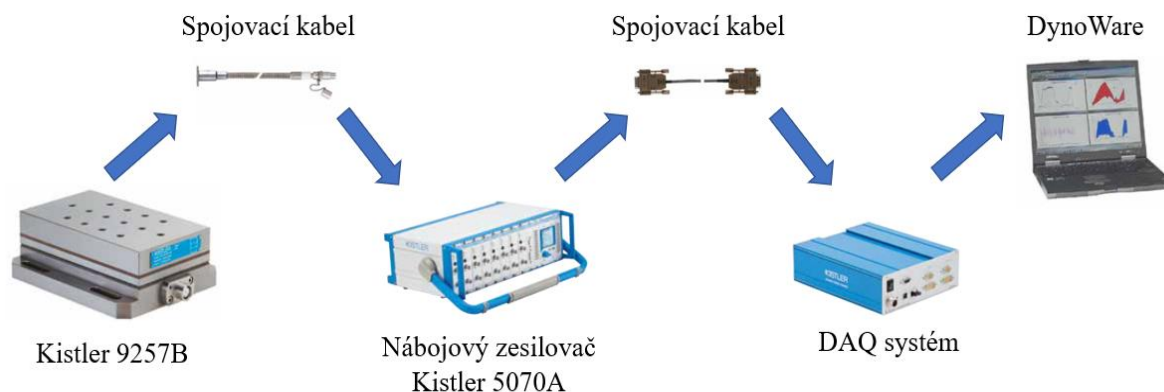
Pro vyhodnocení měření řezných sil je použit stacionární dynamometr značky Kistler, konkrétně Kistler 9257B.

Během podélného soustružení jsou měřeny silové složky ve třech směrech podle souřadného systému, tedy v osách x , y a z , což odpovídá složkám sil F_x , F_y a F_z . Výhodou je fakt, že naměřené hodnoty není potřeba přepočítávat, jako například během frézování. Aby bylo měření sil realizovatelné, je potřeba nejdříve zapojit měřicí aparaturu, která se skládá z dynamometru, nábojového zesilovače Kistler 5070A a systému pro sběr a analýzu dat, pomocí které jsou data převedena do počítače. Měřicí aparatury jsou propojeny spojovacími kabely [47].

Dále jsou hodnoty převedeny a graficky zpracovány v tabulkovém procesoru Microsoft Excel. Z naměřených hodnot je poté vypočtena celková výslednice sil, která je dána součtem dílčích složek zaznamenaných sil. Vztah pro výpočet celkové výslednice síly koresponduje se vztahem uvedeným v 1. kapitole (1.10) pro výpočet celkové síly při soustružení, kde složky řezné (F_c), posuvové (F_f) a pasivní (F_p) síly představují jednotlivé souřadnice x , y a z .

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \text{ [N]} \quad (4.1)$$

Na obr. 4.4 je ilustrováno schéma zapojení měřicí aparatury. Pro získání naměřených dat z dynamometru je použit software DynoWare.



Obr. 4.4 Schéma zapojení měřicí aparatury Kistler – podle [47].

4.5.2 Posuzované parametry jakosti povrchu a použitý měřicí přístroj

Další měření v rámci experimentu představuje měření jakosti povrchu realizované po dokončovacích operacích soustružení oceli. Pro tyto účely byly změřeny parametry Ra a Rz. Metodika pro hodnocení výsledných struktur povrchu je dána dle normy ČSN EN ISO 4287.

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra

Norma ČSN EN ISO 4287 definuje parametr Ra jako „aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky“ [44]. Tuto definici lze vyjádřit následujícím vztahem, kde l je označována jako základní posuzovaná délka (někdy též l_r , či l_n) [44]:

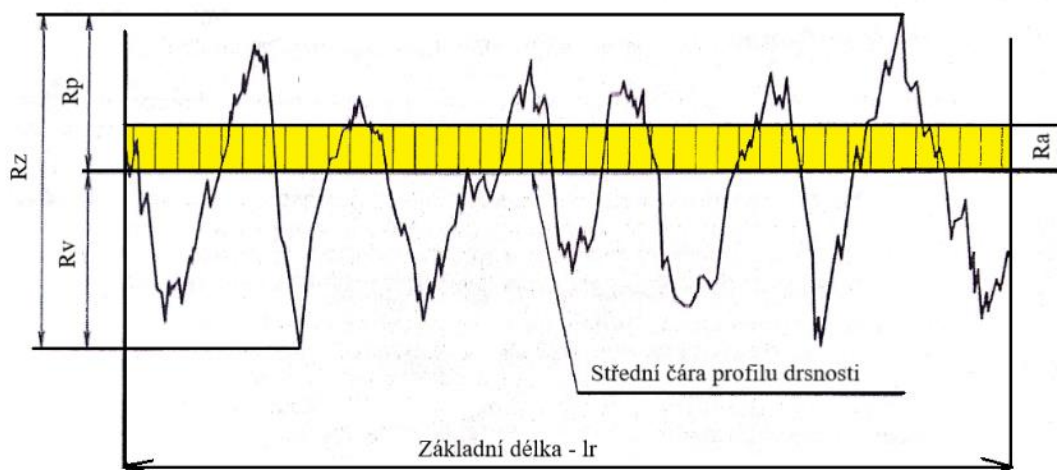
$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad [\mu\text{m}] \quad (4.2)$$

Největší výška profilu Rz

Největší výška profilu Rz je definována dle ČSN EN ISO 4287 jako „součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky“ [44]. V různých literaturách lze nalézt označení výšky nejvyššího výstupku profilu jako R_p a hloubky nejnižší prohlubně profilu jako R_v . Podle definice z norem lze matematicky vyjádřit tuto skutečnost největší výšky profilu Rz následovně – podle [44]:

$$Rz = R_p (Z_p) + R_v (Z_v) \quad [\mu\text{m}] \quad (4.3)$$

Na obr. 4.5 jsou graficky znázorněny parametry Ra a Rz.



Obr. 4.5 Grafické znázornění parametrů Ra a Rz – podle [48].

Drsnoměr Taylor Hobson Surtronic S-128

Pro analýzu výše uvedených parametrů jakosti povrchu byl použit dílenský drsnoměr Taylor Hobson Surtronic řady S-128. Pro tyto přístroje je možné analyzovat profil povrchu s pomocí aplikace Talyprofile. V tab. 4.8 je udána technická specifikace drsnoměru. Na obr. 4.7 je fotografie použitého drsnoměru, který je součástí dílen.

Tab. 4.8 Technické specifikace drsnoměru Taylor Hobson Surtronic S-128 – podle [49].

Drsnoměr Taylor Hobson Surtronic S-128	
Hmotnost přístroje [kg]	0,5
Pracovní podmínky – teplota [°C]	5 až 40
Typ snímače	Indukční
Přítlačná síla [mg]	150 – 300
Rozsah snímače [μm]	400 / 100 / 10
Rozlišení snímače [nm]	50 / 10 / 5
Vyhodnocovaná délka [mm]	0,25 – 25
Maximální rozsah v ose X [mm]	25,5
Kalibrace – etalon	Etalon drsnosti – dle ISO 4287



Obr. 4.7 Použitý drsnoměr Taylor Hobson Surtronic S-128.

4.6 Průběh měření silového zatížení

V samotném průběhu měření silového zatížení bylo potřeba nastavit a zapojit dynamometr Kistler. Použitý soustružnický nůž byl umístěn do nástrojového držáku a skrze něj propojen kabely k aparatuře. Následně se pomocí závaží zkalibrovaly hodnoty zatížení a nastavil se rozsah měření dílčího silového zatížení. K těmto úkonům byl použit zkušební obrobek. Jelikož se jedná o zatížení sledované v průběhu času, musel být stanoven strojní čas pro soustružení. Pro všech 12 ks kalených obrobků o délce 60 mm a průměru 32 mm byla stanovena soustružená dráha $L = 40$ mm, z čehož lze vyjít pro výpočet čistého strojního času soustružení (viz vztah 4.4). Pro každý vzorek byl zaznamenáván jeden průjezd ($i = 1$).

V tab. 4.9 jsou veškeré kombinace požadovaných vstupních hodnot a implementovány do průběhu a postupu během soustružení. Po přípravě měřicího stanoviště bylo postupně soustruženo 12 ks vzorků, které se označovaly číslem pro lepší identifikaci.

Tab. 4.9 Zvolený postup během soustružení s kombinacemi řezných podmínek.

Číslo vzorku	Řezná rychlost v_c [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	Posuv na otáčku f [mm]	Šířka záběru ostří a_p [mm]	Otáčky n [min^{-1}]	Strojní čas t_{AS} [min]
1	130	0,05	0,2	1293	0,62
2		0,05	0,35		
3		0,1	0,2		0,31
4		0,1	0,35		
5	155	0,05	0,2	1542	0,52
6		0,05	0,35		
7		0,1	0,2		0,26
8		0,1	0,35		
9	180	0,05	0,2	2000	0,40
10		0,05	0,35		
11		0,1	0,2		0,20
12		0,1	0,35		

Příklad určení strojního času pro soustružení vzorku č. 1:

$$t_{AS} = \frac{L \cdot i}{n \cdot f} [\text{min}] \quad (4.4)$$

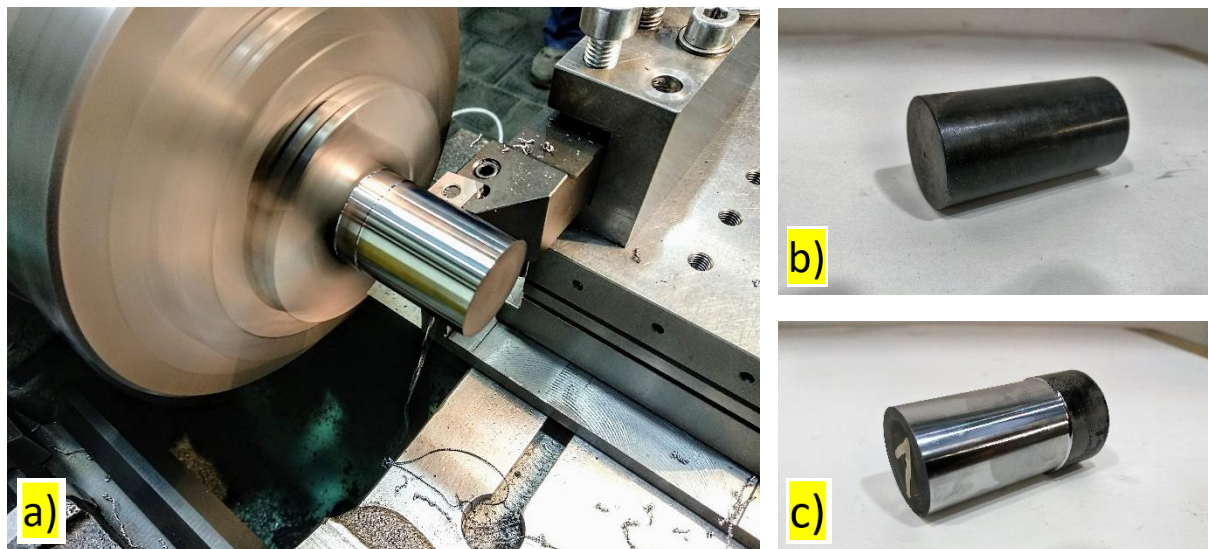
kde otáčky n jsou odvozeny ze vztahu pro výpočet řezné rychlosti v_c ze vztahu (1.1):

$$n = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 130}{\pi \cdot 32} = 1293 \text{ min}^{-1}$$

Po dosažení do vztahu pro strojní čas (4.4) platí:

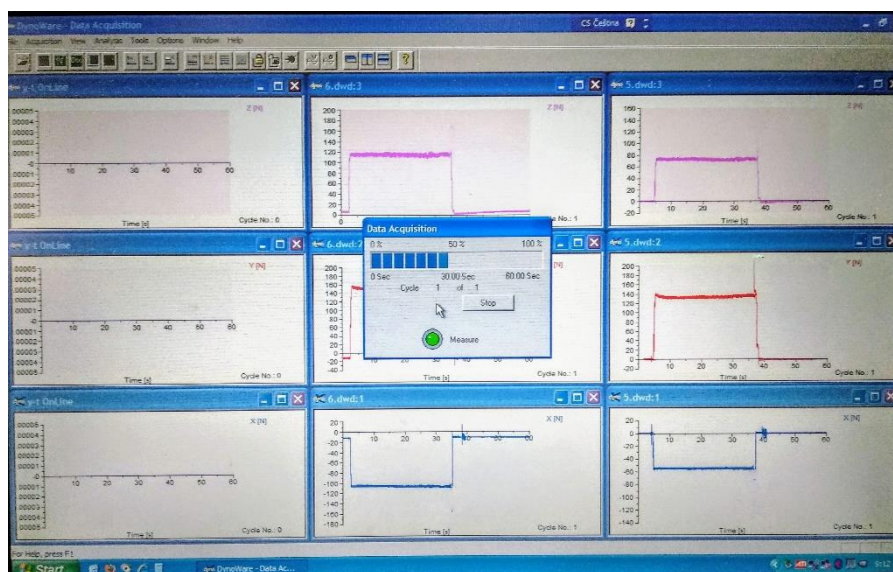
$$t_{AS} = \frac{L \cdot i}{n \cdot f} = \frac{40 \cdot 1}{1293 \cdot 0,05} = 0,62 \text{ min}$$

Na obr. 4.8 je ilustrován průběh podélného soustružení jednoho z obrobků. Lze si povšimnout, že díky absenci procesní kapaliny a geometrii VBD (bez utvařeče třísky) se realizuje plynulá segmentová tříska. Pro lepší viditelnost jsou v příloze 1 přiloženy fotografie těchto realizovaných třísek.



Obr. 4.8 Podélné soustružení: a) průběh soustružení kaleného vzorku, b) před, c) po obrobení.

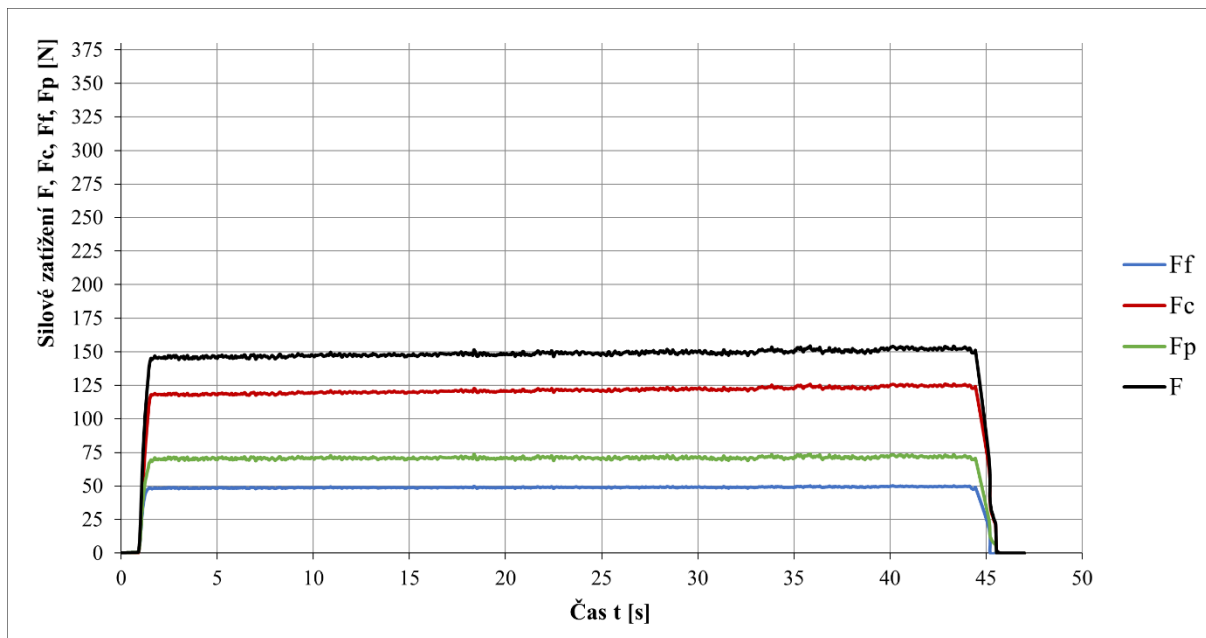
Pro každý dílčí vzorek se spustilo měření a po skončení soustružení byly hodnoty nahrány a uloženy v systému DynoWare (viz obr. 4.9), kde se dále zpracovaly a odfiltrovaly nežádoucí data (měření bylo nastaveno na 60 vteřin, aby pokrylo veškeré hodnoty strojních časů). Upravená data se dále převedla do souboru s příponou .txt a posléze byly v Microsoft Excel vytvořeny grafické závislosti časového průběhu na silovém zatížení.



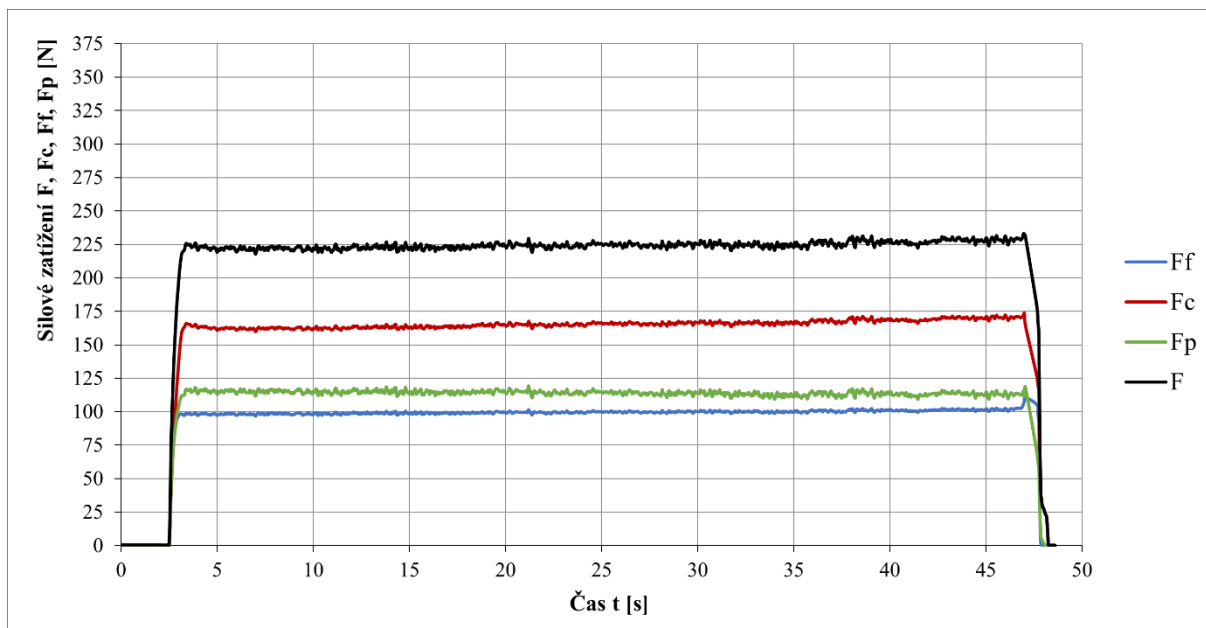
Obr. 4.9 Uživatelské rozhraní DynoWare.

4.7 Grafické vyhodnocení silového zatížení

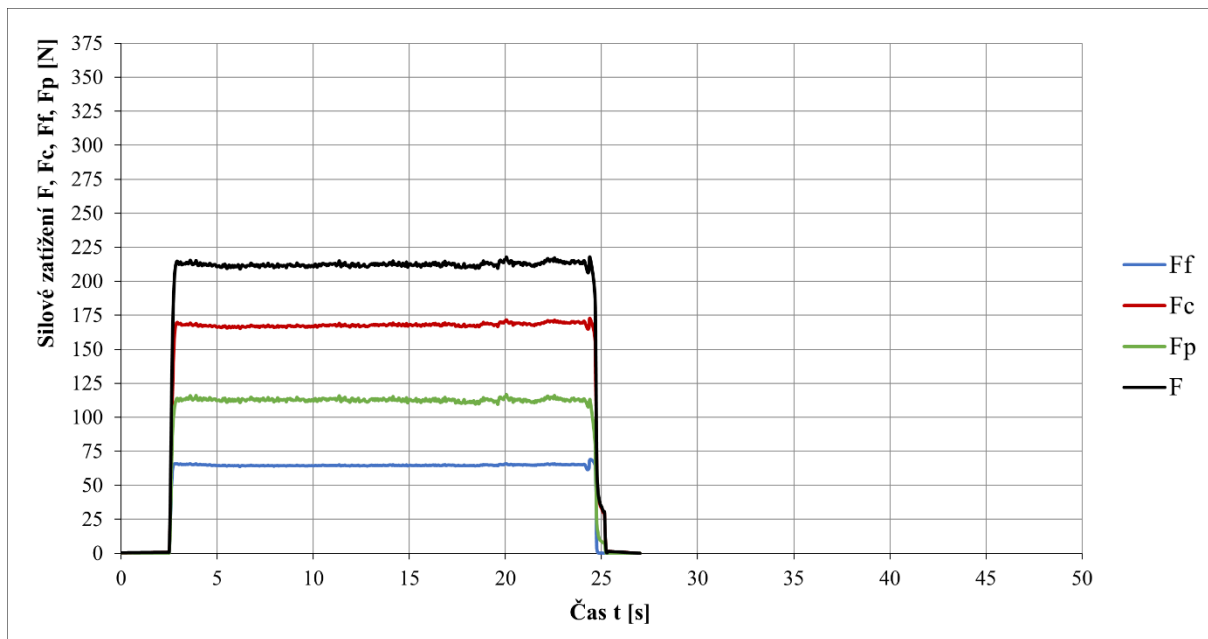
Na obr. 4.10 až obr. 4.21 jsou znázorněny časové průběhy silového zatížení včetně vypočtené celkové řezné síly. Jejich pořadí koresponduje s očíslováním jednotlivých vzorků. Pro všechny obrobené vzorky platí, že na každém z nich byl realizován jeden průjezd a jedno měření.



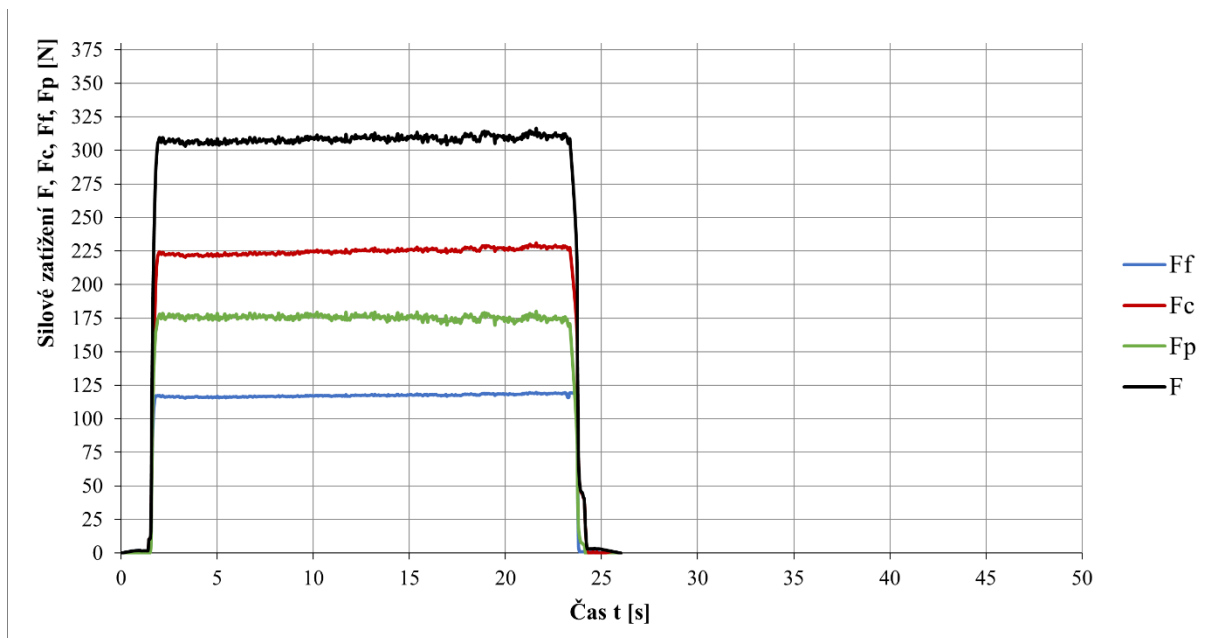
Obr. 4.10 Časový průběh silového zatížení vzorku 1 ($v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,05 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$).



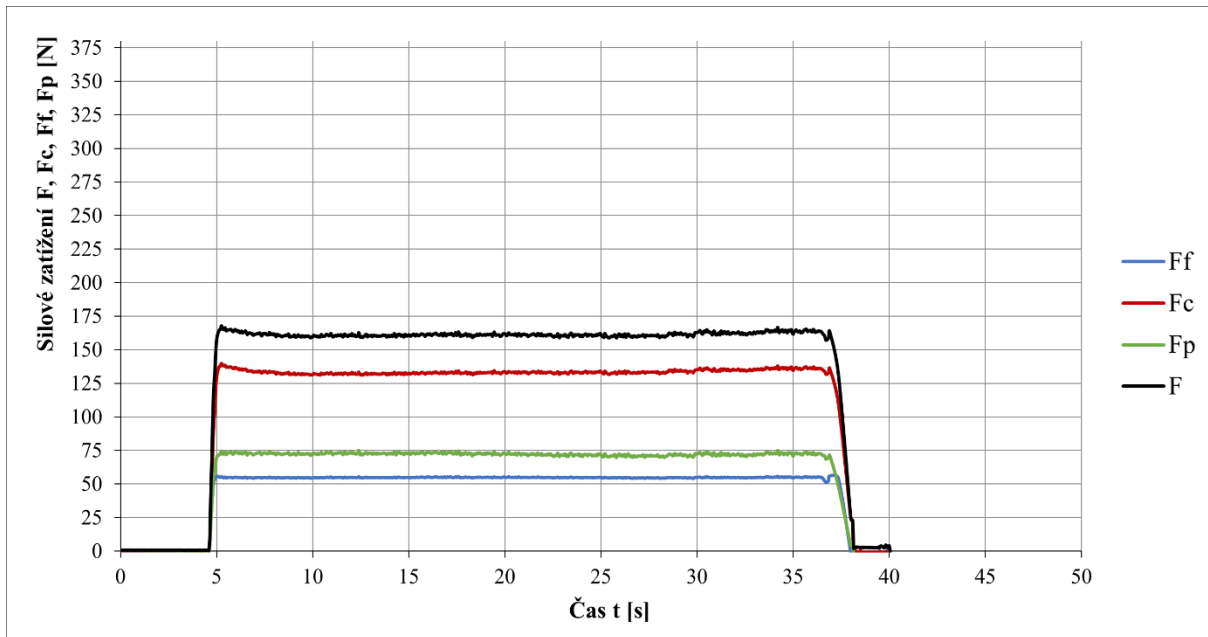
Obr. 4.11 Časový průběh silového zatížení vzorku 2 ($v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,05 \text{ mm}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$).



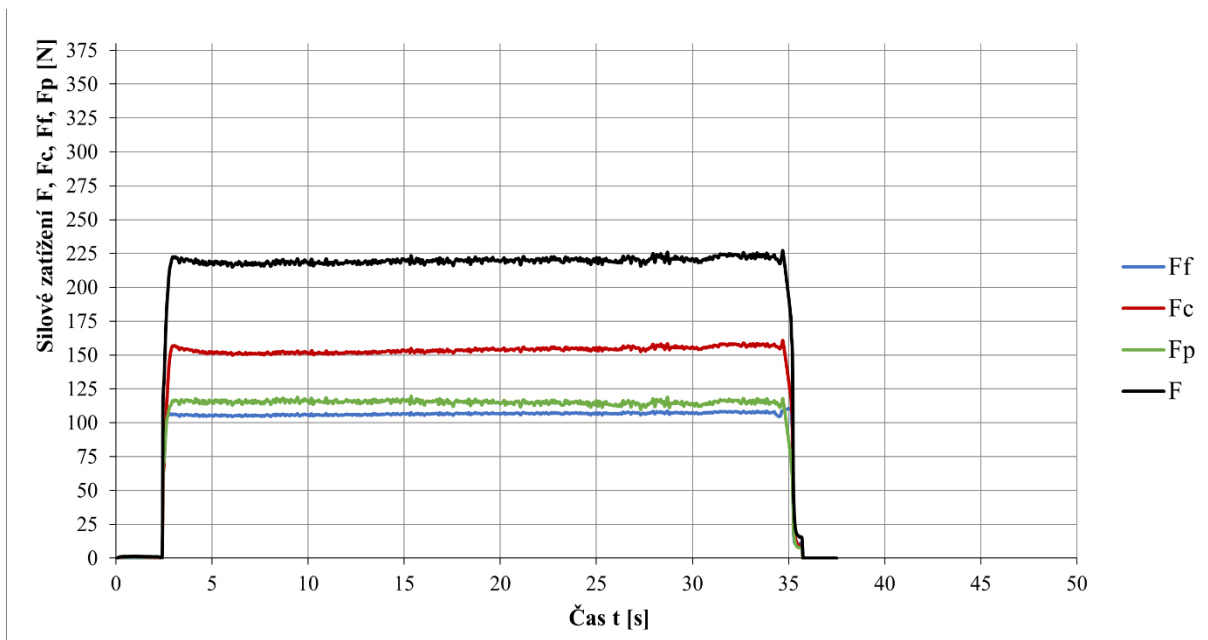
Obr. 4.12 Časový průběh silového zatížení vzorku 3 ($v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,1 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$).



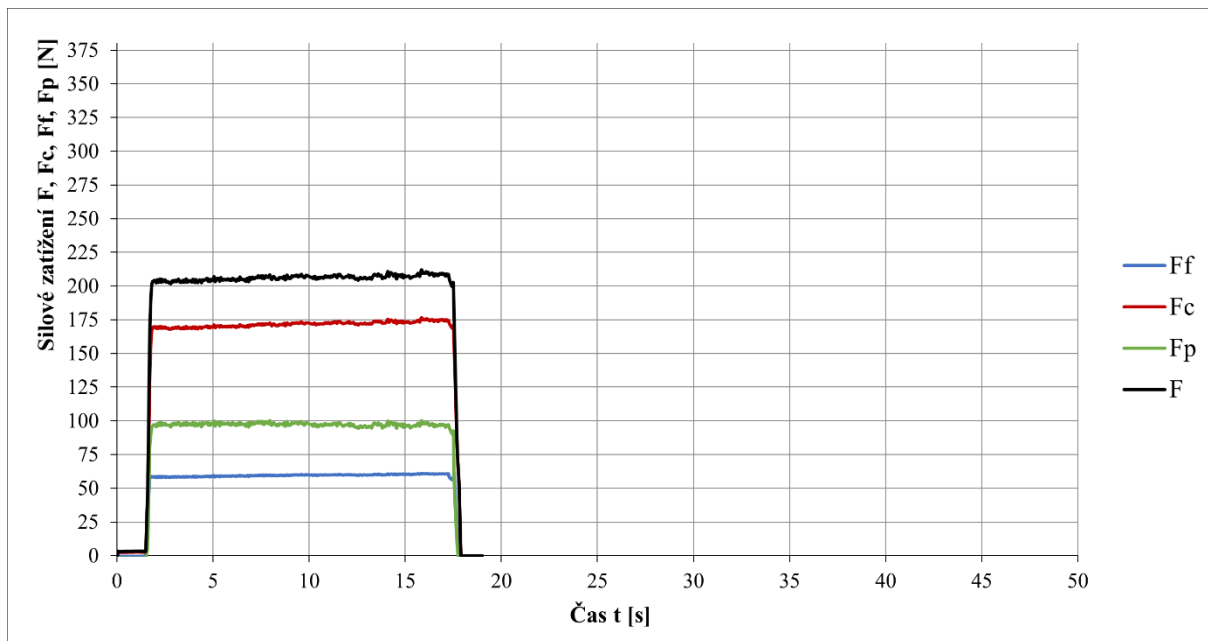
Obr. 4.13 Časový průběh silového zatížení vzorku 4 ($v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,1 \text{ mm}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$).



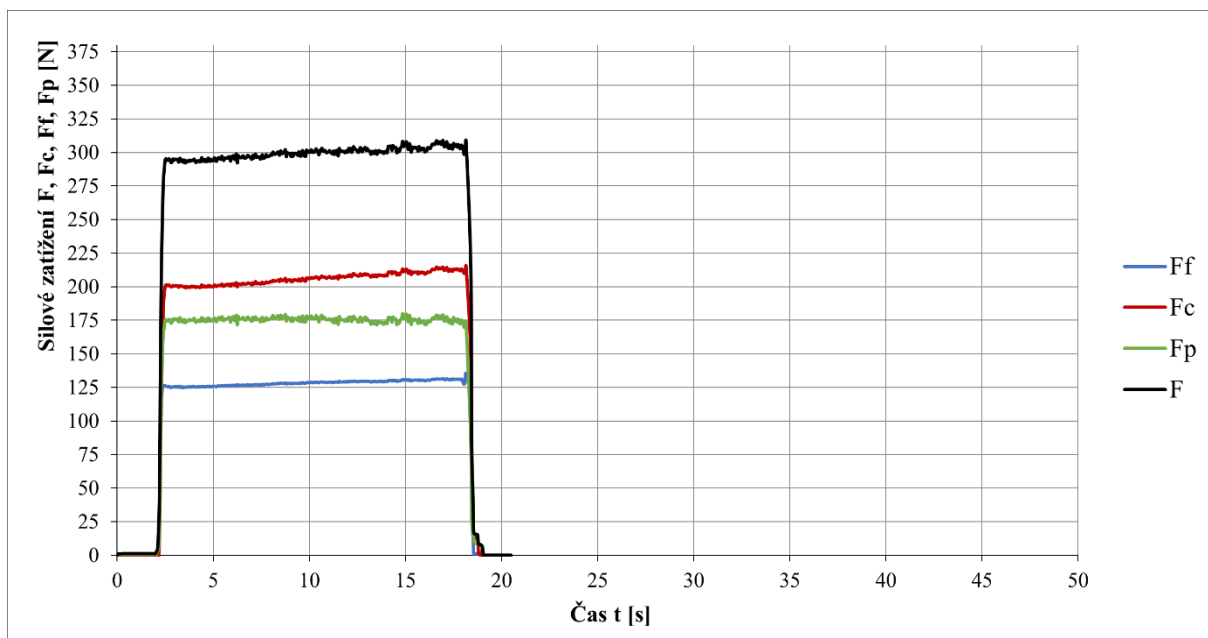
Obr. 4.14 Časový průběh silového zatížení vzorku 5 ($v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,05 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$).



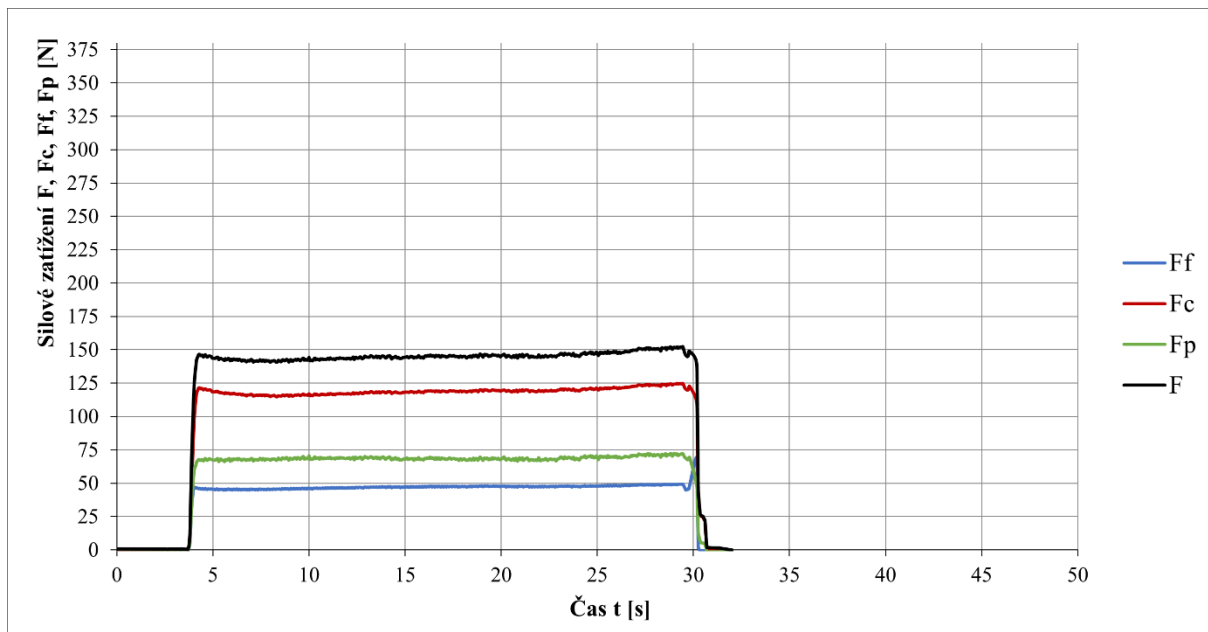
Obr. 4.15 Časový průběh silového zatížení vzorku 6 ($v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,05 \text{ mm}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$).



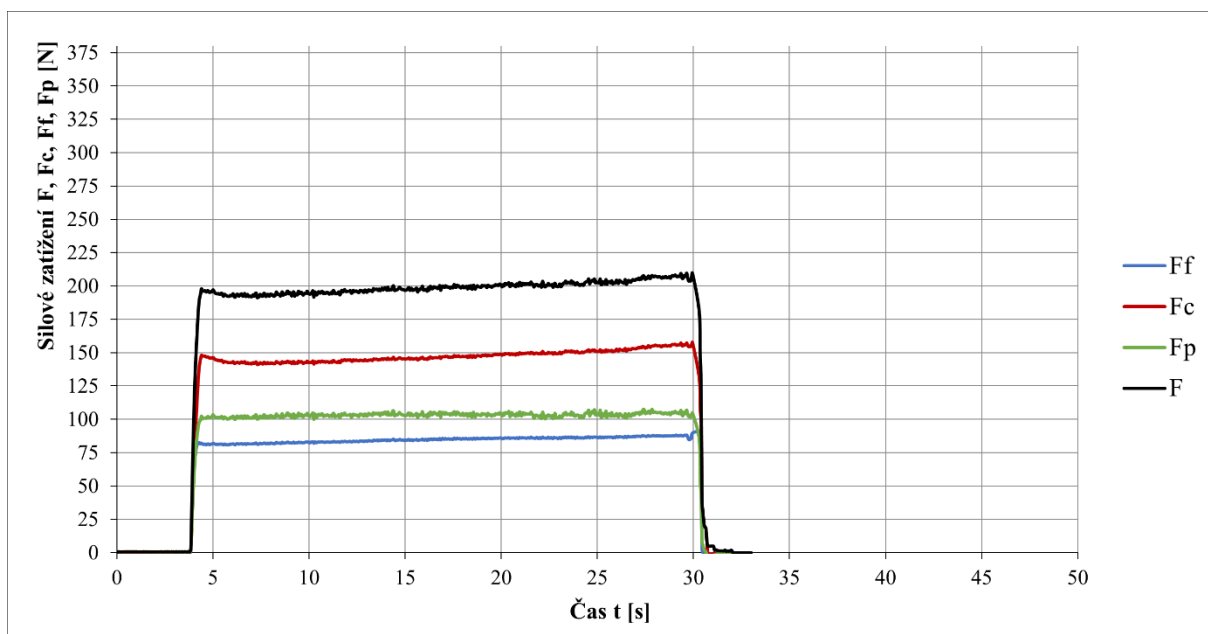
Obr. 4.16 Časový průběh silového zatížení vzorku 7 ($v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,1 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$).



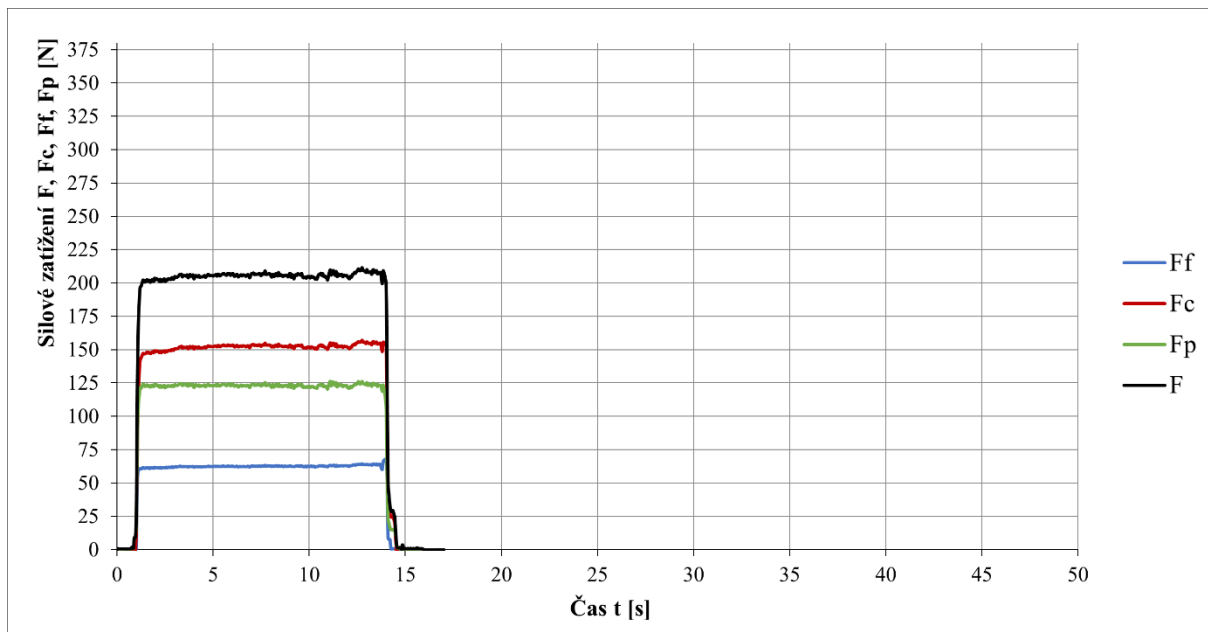
Obr. 4.17 Časový průběh silového zatížení vzorku 8 ($v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,1 \text{ mm}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$).



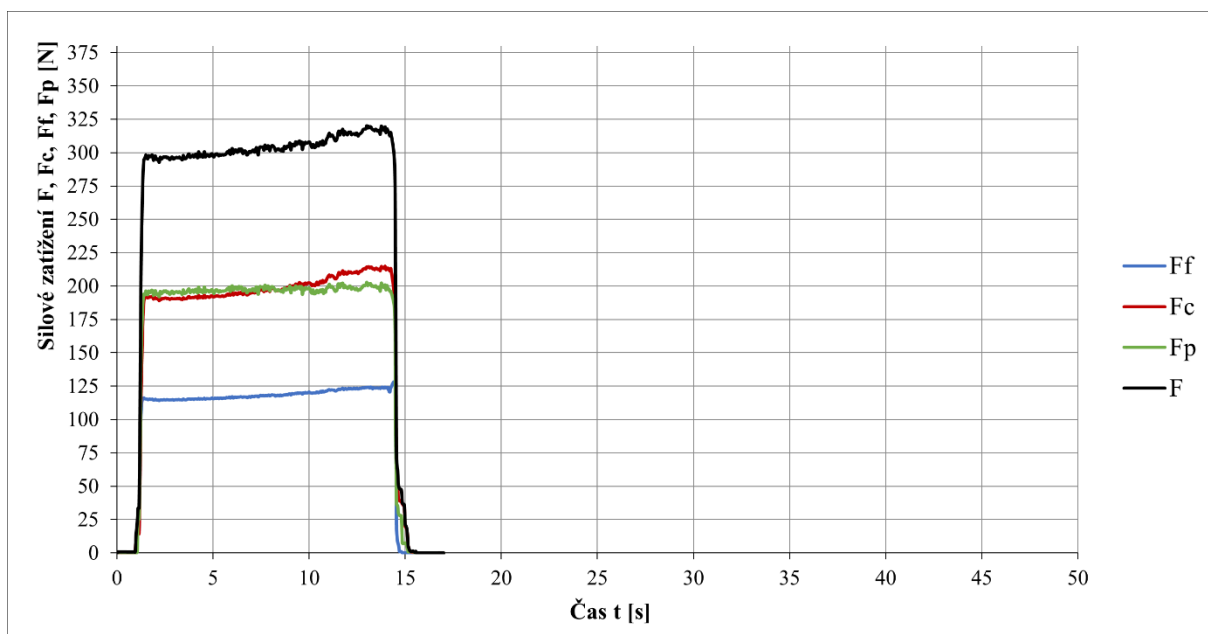
Obr. 4.18 Časový průběh silového zatížení vzorku 9 ($v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,05 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$).



Obr. 4.19 Časový průběh silového zatížení vzorku 10 ($v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,05 \text{ mm}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$).



Obr. 4.20 Časový průběh silového zatížení vzorku 11 ($v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,1 \text{ mm}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$).



Obr. 4.21 Časový průběh silového zatížení vzorku 12 ($v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $f = 0,1 \text{ mm}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$).

Jelikož byl směr posuvové síly F_f během soustružení oproti souřadnému systému dynamometru Kistler opačný, vycházely tak hodnoty záporné. V grafickém vyjádření byly přepočteny na hodnoty kladné.

V tab. 4.10 jsou zaznamenány průměrné hodnoty složek silového zatížení. **Červeně** jsou označeny nejvyšší naměřené hodnoty dané silové složky a **zeleně** naopak nejmenší naměřené hodnoty.

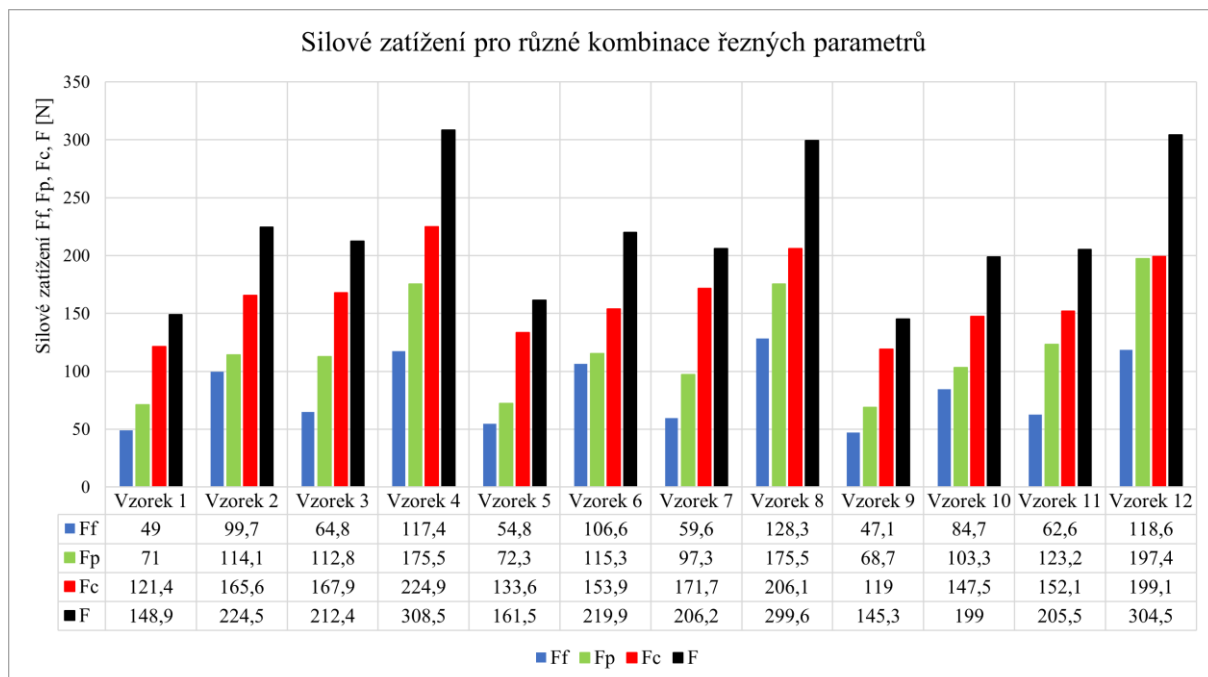
Z průběhů jednotlivých silových zatížení je patrné, že celý proces soustružení probíhal stabilně, což dokazují minimální odchylky v hodnotách jednotlivých sil měřených pro daný časový úsek. Obecně lze tvrdit, že na zvýšení všech složek sil má vliv především nastavení vyšších hodnot šířky záběru ostří a_p a posuvu na otáčku f . Naopak, pokud byla řezná rychlost v_c nastavena na nejvyšší z požadovaných hodnot, tj. $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, tak bylo dosaženo ve většině kombinací parametrů a_p a f nejnižších hodnot všech složek sil. Za zmínku stojí fakt, že u vzorku č. 9 (viz obr. 4.18 a tab. 4.10) vyšly všechny dílčí složky sil, včetně silové výslednice, jako nejmenší. Tento fakt velice napovídá o vhodnosti optimálního nastavení řezných podmínek. Naproti tomu vysoké hodnoty především řezné síly F_c a silové výslednice F byly zaznamenány u vzorků č. 4, 8 a 12, které v porovnání s nejnižšími hodnotami vycházely až dvojnásobně vyšší. Všechny tyto tři vzorky mají společného jmenovatele, a tím jsou nejvyšší požadované hodnoty a_p a f ($a_p = 0,35 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm}$), což potvrzuje tvrzení, že právě tyto parametry mají významný vliv na růst silového zatížení.

U obr. 4.17 a 4.21 je zaznamenán mírný lineární nárůst řezné síly F_c a výsledné síly F , kde v obou případech jsou nastaveny stejné hodnoty a_p a f . Navíc na obr. 4.21 je pasivní síla F_p v první polovině času soustružení dokonce vyšší než řezná síla F_c . Právě vyšší hodnoty pasivní síly F_p jsou projevem obrábění kaleného materiálu, jelikož tato síla vyjadřuje odpor, který daný materiál klade na nástroj. Tím se může také zvyšovat riziko poškození ostří nástroje.

Tab. 4.10 Průměrné hodnoty složek silového působení pro dané řezné podmínky.

Číslo vzorku	Řezná rychlost $v_c [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$	Posuv na otáčku $f [\text{mm}]$	Šířka záběru ostří $a_p [\text{mm}]$	F_f [N]	F_p [N]	F_c [N]	F [N]
1	130	0,05	0,2	49,0	71,0	121,4	148,9
2		0,05	0,35	99,7	114,1	165,6	224,5
3		0,1	0,2	64,8	112,8	167,9	212,4
4		0,1	0,35	117,4	175,5	224,9	308,5
5	155	0,05	0,2	54,8	72,3	133,6	161,5
6		0,05	0,35	106,6	115,3	153,9	219,9
7		0,1	0,2	59,6	97,3	171,7	206,2
8		0,1	0,35	128,3	175,5	206,1	299,6
9	180	0,05	0,2	47,1	68,7	119,0	145,3
10		0,05	0,35	84,7	103,3	147,5	199,0
11		0,1	0,2	62,6	123,2	152,1	205,5
12		0,1	0,35	118,6	197,4	199,1	304,5

Na obr. 4.22 jsou graficky znázorněné průměrné hodnoty složek silového zatížení a celkové řezné síly.



Obr. 4.22 Grafické znázornění průměrných hodnot složek silového zatížení včetně celkové řezné síly.

Z výše uvedených obrázků a tab. 4.10 vyplývá:

Posuvová síla F_f

- Se zvyšující se řeznou rychlostí v_c při daném a_p a f nedochází k výraznému nárůstu síly,
- největší vliv má šířka záběru ostří a_p , kdy při $a_p = 0,35$ mm (vzorky 2, 4, 6, 8, 10, 12) jsou hodnoty téměř dvojnásobné než při $a_p = 0,2$ mm (ostatní vzorky)
- změna posuvu na otáčku f z hodnoty 0,05 mm na 0,1 mm nevytváří tak vysoký nárůst síly v porovnání se změnou a_p .

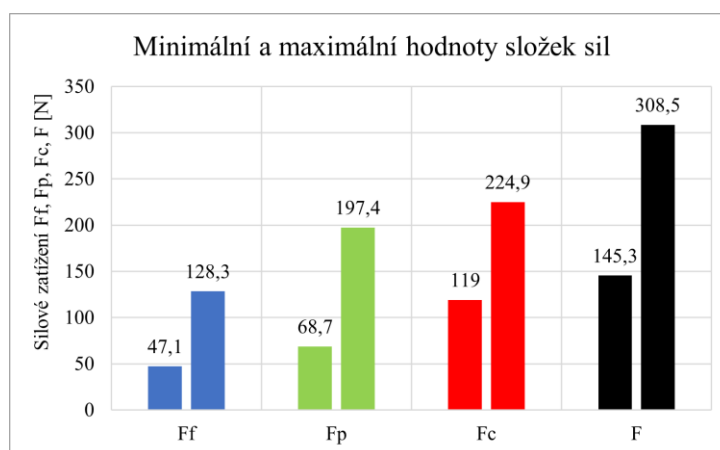
Pasivní síla F_p

- výraznější nárůst F_p je zaznamenán na vzorcích 4, 8 a 12, tudíž v obou případech nastavených vyšších hodnot a_p a f ,
- pokud se zvýší jen f nebo a_p , nedojde k takovému nárůstu jako v případě zvýšení obou hodnot,
- změnou řezné rychlosti v_c není docíleno výraznějších změn při zachování hodnot a_p a f .

Řezná síla F_c

- při řezné rychlosti $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ dochází k poklesu hodnot F_c ve srovnání s nižšími v_c za předpokladu porovnání stejných hodnot a_p a f (například porovnání vzorků 4, 8 a 12),
- pokud jsou nastaveny nižší hodnoty a_p a f , tvoří F_c velkou část z celkové hodnoty F (vzorky 1, 5, 9),
- pokud jsou nastaveny vyšší hodnoty a_p a f , pak má F_p výraznější vliv společně s F_c na celkovou F (vzorky 4, 8, 12), například u vzorku 12 je téměř totožná se silou F_c .

Na obr. 4.23 jsou znázorněny rozdíly mezi minimální a maximální hodnotou dílčích složek silového zatížení. Zde se ukazuje důležitost analýzy měření silového zatížení během obráběcího procesu, kdy za vhodně zvolených řezných podmínek jsme schopni se dostat i na poloviční hodnoty. Nicméně neméně důležitá je také preference způsobu strategie obrábění daného výrobního podniku. Pokud je kladen požadavek na co nejrychlejší strojní časy a tím zvýšení produktivity obrábění, mohou pak složky řezných sil vycházet vyšší, jelikož je potřeba zvýšit posuv na otáčku f a zrychlit výkonnost obrábění (vyšší a_p). Kdežto pokud by byl požadavek kladen například na optimalizaci nástrojového portfolia směrem k hospodárnosti a vyšší životnosti nástrojů, mohlo by se vycházet mj. i z hodnot silového zatížení, kde by se uvažovaly nižší hodnoty.



Obr. 4.23 Minimální a maximální hodnoty dílčích složek silového zatížení a celkové řezné síly.

Z obr. 4.23 vyplývá:

- Nejnižší $F_f = 47,1$ N za podmínek: $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $f = 0,05 \text{ mm}$ (vzorek 9),
- nejvyšší $F_f = 128,3$ N za podmínek: $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm}$ (vzorek 8),
- posuvová síla F_f zaznamenala největší nárůst o 272,4 %,
- nejnižší $F_p = 68,7$ N za podmínek: $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $f = 0,05 \text{ mm}$ (vzorek 9),
- nejvyšší $F_p = 197,4$ N za podmínek: $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm}$ (vzorek 12),
- pasivní síla F_p zaznamenala největší nárůst o 287,3 %,
- nejnižší $F_c = 119,0$ N za podmínek: $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $f = 0,05 \text{ mm}$ (vzorek 9),
- nejvyšší $F_c = 224,9$ N za podmínek: $v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm}$ (vzorek 4),
- řezná síla F_c zaznamenala největší nárůst o 189 %,
- nejnižší $F = 145,3$ N za podmínek: $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $f = 0,05 \text{ mm}$ (vzorek 9),
- nejvyšší $F = 305,8$ N za podmínek: $v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm}$ (vzorek 4).
- celková řezná síla F zaznamenala největší nárůst o 212,3 %.

4.8 Průběh měření jakosti povrchu

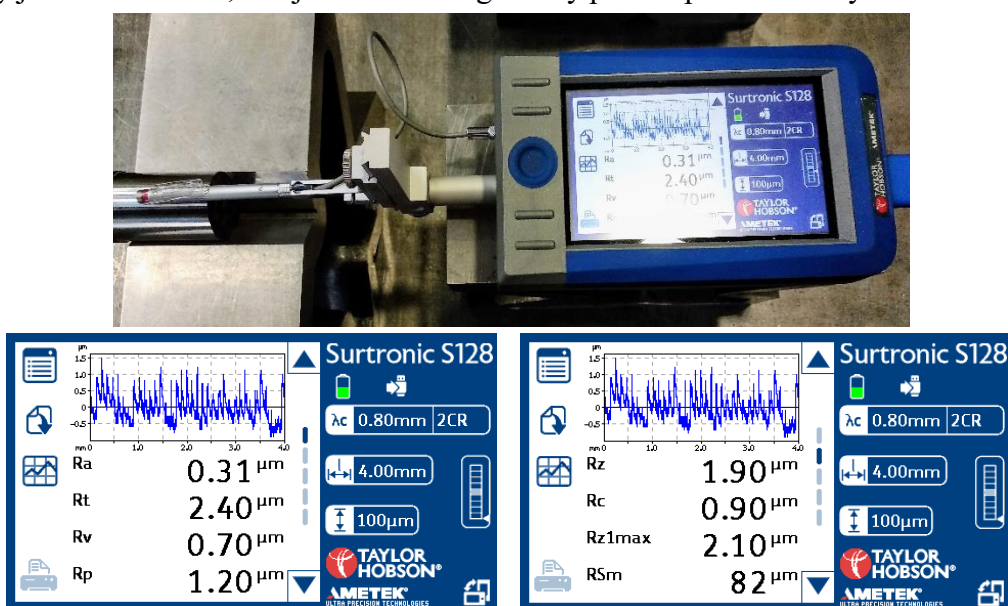
Poté, co bylo 12 ks vzorků podrobena silové analýze během podélného soustružení, měřily se pomocí drsnoměru Taylor Hobson Surtronic S-128 parametry jakosti povrchu, kde byly zaznamenány hodnoty průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu R_a a největší výšky profilu R_z .

Pro zajištění přesného měření bylo nutné uložit měřený vzorek tak, aby dráha, kterou rameno drsnoměru s diamantovým hrotem vykonává, byla rovnoběžná s plochou vzorku. K tomuto účelu byl použit dílenský prizmatický přípravek, pomocí něhož se vhodně ustaví poloha. Měření probíhalo tak, že se každý vzorek změřil třikrát, přičemž byl mezi jednotlivými měřeními pootočen přibližně o 120° . Na obr. 4.24 je zaznamenán průběh měření pro vzorek č.3. Každý vzorek se před měřením očistil od prachu či různých nečistot.



Obr. 4.24 Průběh měření jakosti povrchu.

Drsnoměr byl nastaven na rozsah snímače $100\text{ }\mu\text{m}$. Vyhodnocovaná délka činila 4 mm a pohybovala se tam i zpět po ose X. Hodnota $\lambda_c = 0,80\text{ mm}$ značí délku dráhy, po které bylo před měřením prováděno kalibrování dle normy ISO 4287. Tyto údaje a výstupní naměřené hodnoty jsou na obr. 4.25, kde je znázorněn i grafický průběh povrchu na vyhodnocované délce.



Obr. 4.25 Výstupní naměřené hodnoty drsnoměru Taylor Hobson Surtronic S-128.

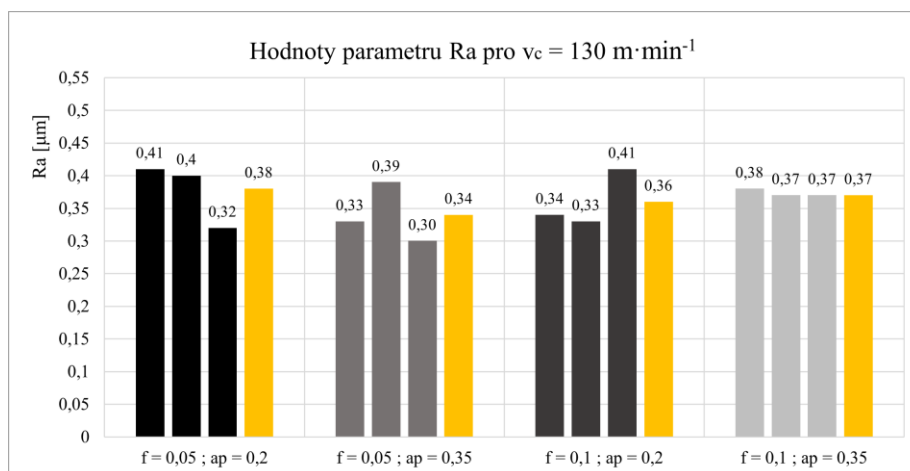
4.9 Vyhodnocení měření jakosti povrchu

Po změření všech 12 ks testovaných vzorků byla vyhodnocená data zaznamenána do počítače, kde se převzaly měřené parametry. V následující tab. 4.11 jsou měřené parametry seřazeny k příslušným vzorkům včetně řezných podmínek pro jednoznačné porovnání, jak velký vliv na výslednou jakost povrchu mají. Pro každý vzorek byly naměřeny 3 hodnoty, dále je uvedena jejich průměrná hodnota. **Červenou** barvou jsou označeny nejvyšší hodnoty, **zelenou** nejnižší.

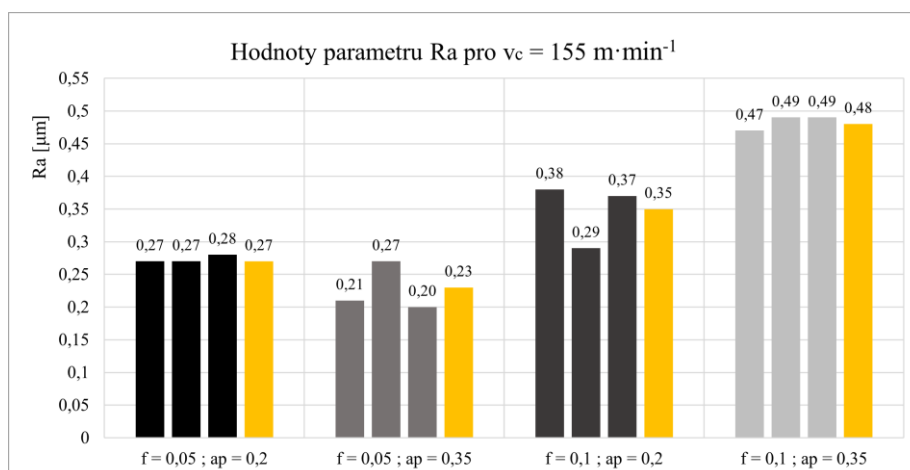
Tab. 4.11 Naměřené hodnoty Ra a Rz v závislosti na řezných podmínkách.

Číslo vzorku	Řezná rychlost v_c [m·min ⁻¹]	Posuv na otáčku f [mm]	Šířka záběru ostří a_p [mm]	Ra [μm]	\overline{Ra} [μm]	Rz [μm]	\overline{Rz} [μm]
1	130	0,05	0,2	0,41	0,38	2,40	2,27
				0,40		2,40	
				0,32		2,00	
2		0,05	0,35	0,33	0,34	2,00	2,17
				0,39		2,60	
				0,30		1,90	
3		0,1	0,2	0,34	0,36	2,10	2,17
				0,33		1,90	
				0,41		2,50	
4		0,1	0,35	0,38	0,37	2,20	2,23
				0,37		2,10	
				0,37		2,40	
5	155	0,05	0,2	0,27	0,27	1,60	1,63
				0,27		1,60	
				0,28		1,70	
6		0,05	0,35	0,21	0,23	1,30	1,43
				0,27		1,70	
				0,20		1,30	
7		0,1	0,2	0,38	0,35	2,20	2,17
				0,29		2,10	
				0,37		2,20	
8		0,1	0,35	0,47	0,48	2,70	2,87
				0,49		2,80	
				0,49		3,10	
9	180	0,05	0,2	0,26	0,28	1,60	1,73
				0,28		1,80	
				0,30		1,80	
10		0,05	0,35	0,41	0,36	2,30	2,07
				0,38		2,20	
				0,28		1,70	
11		0,1	0,2	0,31	0,30	2,10	1,90
				0,29		1,80	
				0,29		1,80	
12		0,1	0,35	0,28	0,30	1,90	1,93
				0,31		2,00	
				0,31		1,90	

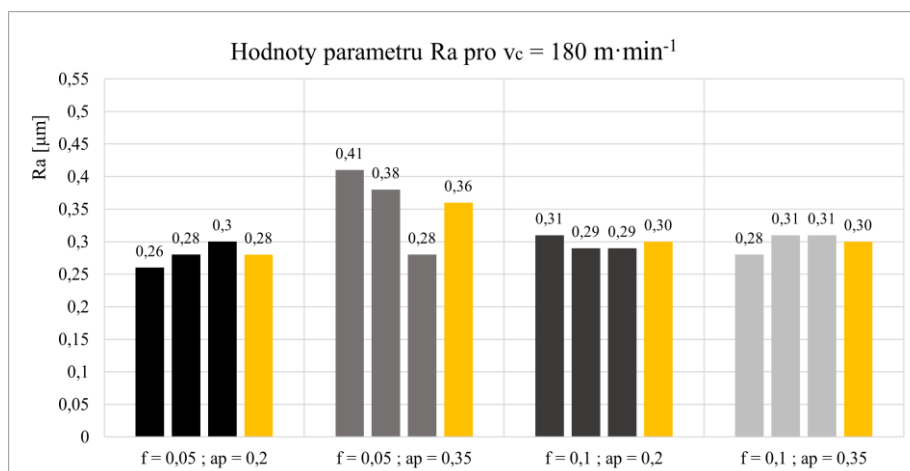
Na obr. 4.26 až 4.28 jsou pro přehlednost graficky znázorněny velikosti parametru R_a pro tři různé hodnoty řezných rychlostí v_c a jim odpovídající řezné parametry. **Žlutě označená hodnota** je hodnota R_a průměrná pro danou kombinaci řezných podmínek a_p a f .



Obr. 4.26 Hodnoty parametru R_a pro $v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s různými kombinacemi a_p a f .



Obr. 4.27 Hodnoty parametru R_a pro $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s různými kombinacemi a_p a f .



Obr. 4.28 Hodnoty parametru R_a pro $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s různými kombinacemi a_p a f .

Na základě tab. 4.11 a obr. 4.26 až obr. 4.28 lze tvrdit, že během nastavené řezné rychlosti $v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ nedochází k výraznějším rozdílům v souvislosti se změnami šířky záběru ostří a_p a posuvu na otáčku f . Obecně platí, že výsledná jakost povrchu je závislá především na velikosti posuvu na otáčku f , čím je nižší, tím jakost povrchu nabývá nižších hodnot. Průměrné hodnoty aritmetické úchylky posuzovaného profilu R_a se dle obr. 4.26 pohybují mezi $0,3$ a $0,4 \text{ } \mu\text{m}$. Pro řeznou rychlost $v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ se jeví jako nejlepší kombinace řezných podmínek $a_p = 0,35 \text{ mm}$ a $f = 0,05 \text{ mm}$, kdy průměrná hodnota R_a je rovna $0,34 \text{ } \mu\text{m}$.

Nejlepší (tj. nejmenší) hodnoty parametru R_a vycházely pro řeznou rychlost $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ v kombinaci s $a_p = 0,35 \text{ mm}$ a $f = 0,05 \text{ mm}$ (viz obr. 4.27), kdy průměrná hodnota R_a činí $0,23 \text{ } \mu\text{m}$, jedná se o vzorek č. 6. Nicméně pro stejnou řeznou rychlost v_c a zvýšením posuvu na otáčku na hodnotu $f = 0,1 \text{ mm}$ při stejné hodnotě a_p byla průměrná hodnota R_a rovna $0,48 \text{ } \mu\text{m}$, což představuje nárůst přibližně o 209 % (pro vzorek č. 8). Tyto výkyvy mohou být zapříčiněny také z důvodu nepřesnosti lidského faktoru během měření nebo se může na povrchu vzorku objevit trhlina, která byla naměřena. Tyto faktory lze eliminovat početnějším opakováním měření.

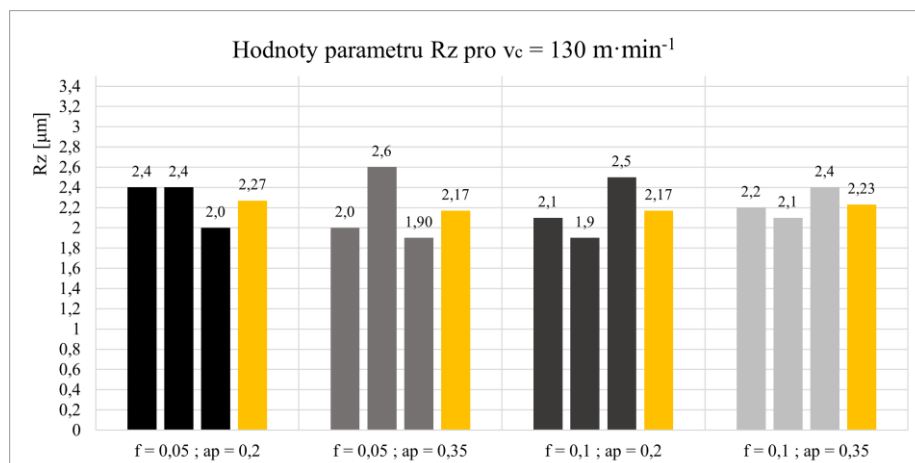
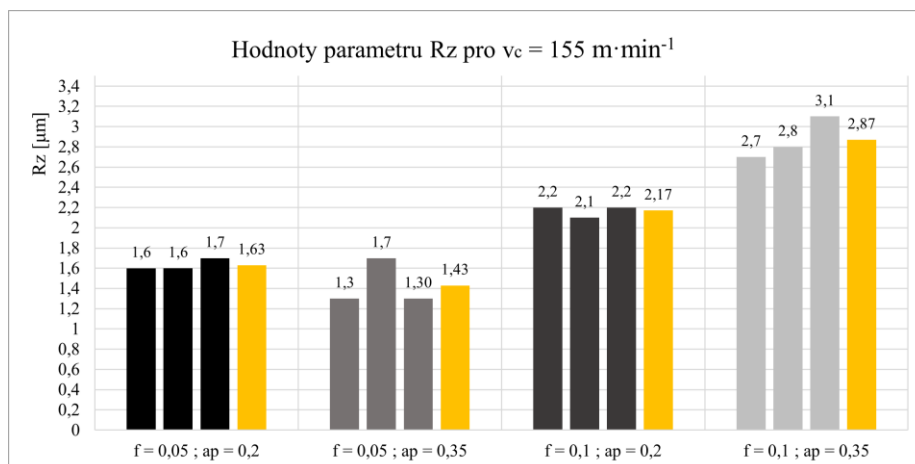
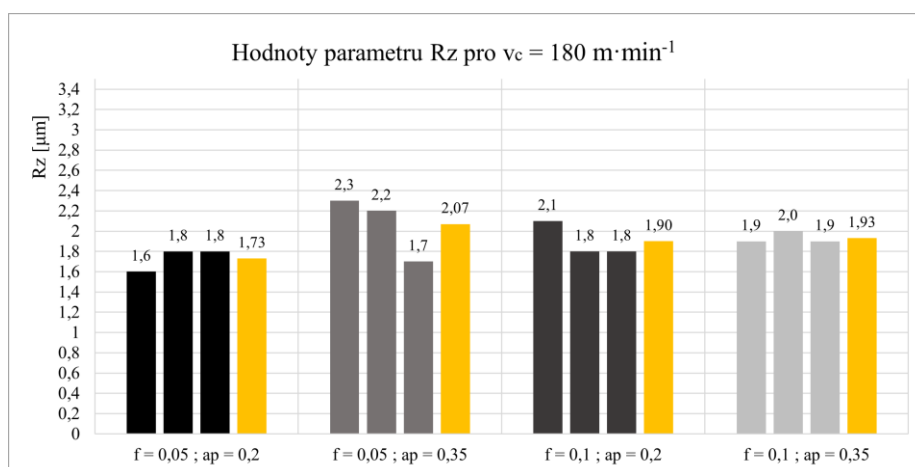
Na obr. 4.28 pro řeznou rychlost $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ lze pozorovat, že stabilnější hodnoty jakosti povrchu jsou zaznamenány v souvislosti se zvýšením posuvu na otáčku f z $0,05 \text{ mm}$ na $0,1 \text{ mm}$. Průměrné hodnoty parametru R_a se pohybují na $0,3 \text{ } \mu\text{m}$. Opět se zde projevuje malý počet měření, konkrétně pro vzorek č. 10 ($f = 0,05 \text{ mm}$ a $a_p = 0,35 \text{ mm}$), kde výsledné hodnoty R_a velice kolísají.

Z dostupných analýz vyplývá, že na změnu řezné rychlosti v_c je výsledná jakost povrchu závislá. Například, pokud jsou ponechány na stejné hodnotě parametry a_p a f , kde byl zaznamenán nejlepší výsledek hodnoty R_a , tj. $f = 0,05 \text{ mm}$ a $a_p = 0,35 \text{ mm}$, tak průměrná hodnota R_a pro $v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ činí $0,34 \text{ } \mu\text{m}$, u $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ činí pouze $0,23 \text{ } \mu\text{m}$ a pro $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ je R_a opět na čísle $0,36 \text{ } \mu\text{m}$. Tudíž neplatí, že čím vyšší v_c , tím lepší jakost povrchu a naopak. A právě obr. 4.27 také nejvíce demonstrovuje fakt, že na výsledné jakosti povrchu je závislá hodnota posuvu na otáčku f , kdy při zvýšení z $f = 0,05 \text{ mm}$ na $f = 0,1 \text{ mm}$ dochází k téměř dvojnásobnému nárůstu hodnot R_a .

Co se týče výsledných průměrných hodnot R_a , tak pro vzorky 5, 6, 9, 11 a 12 nebylo dosaženo hodnoty vyšší než $R_a = 0,30 \text{ } \mu\text{m}$. Tyto vzorky mají řeznou rychlost $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Obecně lze na základě dosažených výsledků tvrdit, že z 12 ks obráběných vzorků s různými kombinacemi řezných podmínek se 11 ks během měření dostalo průměrnými hodnotami pod hodnotu $R_a = 0,4 \text{ } \mu\text{m}$. Běžnými dokončovacími VBD z jiných materiálů než je PKNB je problematické se na tuto hodnotu dostat. Z toho vyplývá, že materiál VBD z PKNB je schopný nahradit i do určité míry dokončovací operace jako jsou například broušení.

V následujících obr. 4.29 až 4.31 jsou zobrazeny hodnoty největší výšky profilu R_z . Jak je patrné, jednotlivé hodnoty a jejich výše úzce souvisí právě s velikostí průměrné aritmetické úchylky posuzovaného profilu R_a . Opět jsou zde **žlutou barvou** vyznačeny průměrné hodnoty R_z pro danou kombinaci a_p a f .

Obr. 4.29 Hodnoty parametru Rz pro $v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s různými kombinacemi a_p a f .Obr. 4.30 Hodnoty parametru Rz pro $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s různými kombinacemi a_p a f .Obr. 4.31 Hodnoty parametru Rz pro $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ s různými kombinacemi a_p a f .

Na obr. 4.29 lze vidět, že při $v_c = 130 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ se hodnoty největší výšky profilu v závislosti na různých kombinacích řezných podmínek jeví stabilně, není zde žádná velká odchylka od průměrných hodnot. Průměrné hodnoty největší výšky profilu R_z se pohybují v rozmezí od $R_z = 2,17 \text{ } \mu\text{m}$ do $R_z = 2,27 \text{ } \mu\text{m}$.

Naproti tomu obr. 4.30 ukazuje, že odchylka průměrných hodnot je zde markantně vyšší než na předchozím grafu. Zatímco průměrné hodnoty během $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f = 0,05 \text{ mm}$ v kombinaci se dvěma hodnotami a_p se pohybovaly od $R_z = 1,43 \text{ } \mu\text{m}$ do $R_z = 1,63 \text{ } \mu\text{m}$ (které byly z celé měřené série nejnižší), tak po zvýšení hodnoty f na $0,1 \text{ mm}$ vzrostly hodnoty R_z až na průměrnou hodnotu $2,87 \text{ } \mu\text{m}$.

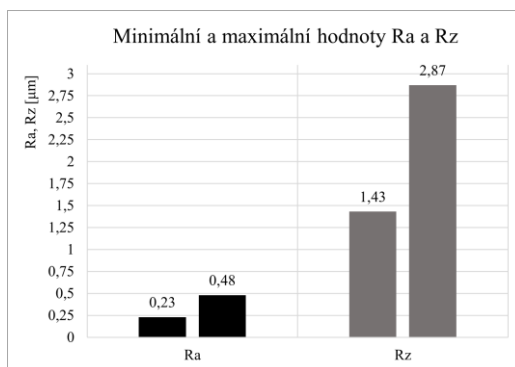
Po zvýšení na řeznou rychlost $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ (viz obr. 4.31) se opět hodnoty R_z jeví ve stabilnějších odchylkách. Jejich průměrné hodnoty se pohybovaly téměř ve všech případech pod hodnotou $R_z = 2 \text{ } \mu\text{m}$.

Jelikož největší výška profilu R_z se skládá ze součtu nejvyššího výstupku profilu R_p a nejnižší prohlubně profilu R_v , byly do tab. 4.12 vepsány průměrné hodnoty R_p a R_v pro každý vzorek. Průměrná hodnota se skládá ze tří měření, jako tomu bylo již při předchozích analýzách. Z tab. 4.12 je patrné, že vyšší hodnoty převažují u parametru R_p , tudíž u profilu obrobků převažují vyšší výstupky než prohlubně.

Tab. 4.12 Průměrné hodnoty R_p a R_v podle čísla vzorku během měření.

Číslo vzorku											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$R_p \text{ } [\mu\text{m}]$											
1,17	1,17	1,15	1,30	0,80	0,67	1,30	1,43	0,87	1,13	1,17	1,23
$R_v \text{ } [\mu\text{m}]$											
1,10	1,00	1,02	0,93	0,87	0,77	0,87	1,00	0,83	0,93	0,77	0,70

Obr. 4.32 pak představuje minimální a maximální hodnoty R_a a R_z (průměr ze tří měření).



Obr. 4.32 Minimální a maximální hodnoty R_a a R_z .

Z obr. 4.32 vyplývá, že nárůst hodnoty R_a je o 209 % a nárůst hodnoty R_z je o 201 %, přičemž:

- $R_{a\min} = 0,23 \text{ } \mu\text{m}$ je za podmínek: $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$, $f = 0,05 \text{ mm}$ (vzorek 6),
- $R_{a\max} = 0,48 \text{ } \mu\text{m}$ je za podmínek: $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm}$ (vzorek 8),
- $R_{z\min} = 1,43 \text{ } \mu\text{m}$ je za podmínek: $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$, $f = 0,05 \text{ mm}$ (vzorek 6),
- $R_{z\max} = 2,87 \text{ } \mu\text{m}$ je za podmínek: $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm}$ (vzorek 8).

4.10 Stanovení přímých nákladů v závislosti na trvanlivosti bříty nástroje

Pro stanovení přímých nákladů na obrobení 1 ks součásti bude vycházeno ze vztahu (4.5), který je v praxi využíván zejména v optimalizačních postupech pro stanovení minimálních nákladů pro optimální trvanlivost bříty nástroje, jenž je definován z hlediska časového, kdy je pro daný břit nástroje stanovena kritériální hodnota otupení. Tento stav lze posuzovat buď z hlediska ekonomického nebo z hlediska technologického [4].

Ekonomické hledisko zohledňuje míru dosaženého otupení bříty nástroje podle kritéria maximální životnosti nebo jako podíl nákladů, které připadají na nástroj, poděleným na obrobení 1 ks dané součásti. Stav, kdy není břit nástroje schopen obrábět v již požadované jakosti povrchu, je kritérium otupení bříty hodnoceno z hlediska technologického [4].

V našem případě bude posouzeno hledisko ekonomické. Do vztahu (4.5) vstupují hodnoty jednotkového strojního času t_{AS} , náklady pro hodinovou sazbu univerzálního hrotového soustruhu SV 18 RD a počet obrobeneých dílců vztažených na náklady pro použití jednoho bříty VBD mezi výměnou. Analýza přímých nákladů bude zaměřena na obrobení toho vzorku, který se jevil nejlépe v kombinaci z hlediska hodnot silového zatížení (tj. nízké průměrné hodnoty) a výsledné jakosti povrchu. Toto kritérium splňuje vzorek č. 9, kde byly zaznamenány nejnižší průměrné hodnoty všech složek silového zatížení a zároveň parametry jakosti povrchu R_a i R_z se lišily v řádu setin oproti nejnižší hodnotě (3 vzorky z 12 byly pod hodnotou $R_a = 0,3 \mu m$). Pro účely tohoto výpočtu byla hodinová sazba soustruhu SV 18 RD zvolena orientačně na základě srovnání různých sazeb podobně technologicky vyspělých soustruhů, sazba se pohybuje v přibližně polovičních hodnotách než je tomu u automatizovaných CNC strojů. Cena břitové destičky vychází z faktury, kde byly pro účely experimentu objednány tyto kusy. VBD obsahuje 2 břity, tudíž se cena vydělila dvěma. Jelikož se jedná o VBD z řezného materiálu PKNB, jeho cena je mnohonásobně vyšší než například cena VBD ze slinutého karbidu. Je to dáno především druhem materiálu s několikanásobně vyšší trvanlivostí a možností v některých případech i nahrazení dokončovacích operací broušením.

Jelikož se v rámci experimentu jednalo o krátkodobé zkoušky, nebyla zde trvanlivost stanovena a proto se stanoví přímé náklady jako funkce trvanlivosti. Vztahy jsou převzaty z literatury [4].

Vstupní hodnoty: $t_{AS} = 0,4 \text{ min}$ $E = 500 \text{ Kč} \cdot \text{hod}^{-1}$ $B = 481 \text{ Kč} \cdot \text{břit}^{-1}$ $\lambda = 0,952$ $A = f(T)$

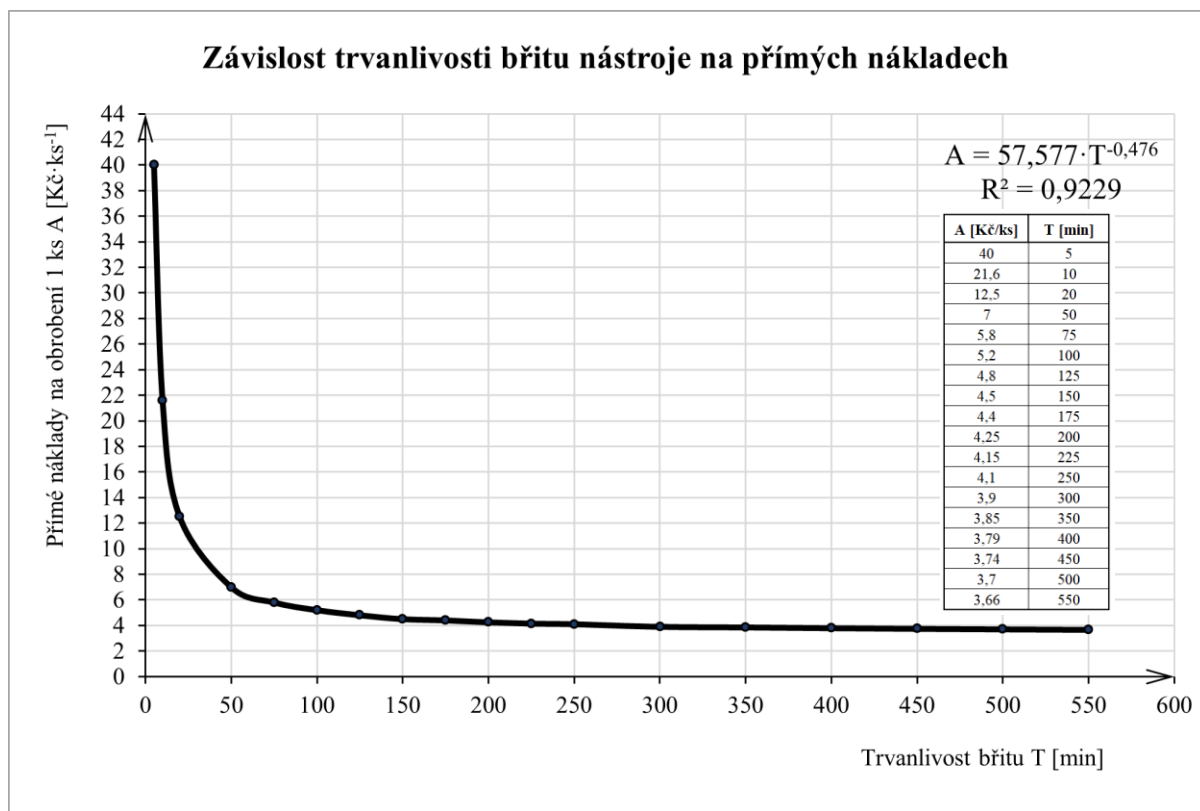
$$A = t_{AS} \cdot \frac{E}{60} + \frac{B}{Q} \quad [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}] \quad (4.5)$$

kde:	$A \quad [\text{Kč} \cdot \text{ks}^{-1}]$	-	přímé náklady na obrobení 1 ks,
	$t_{AS} \quad [\text{min}]$	-	jednotkový strojní čas,
	$E \quad [\text{Kč} \cdot \text{hod}^{-1}]$	-	náklady na 1 hodinu provozu soustruhu,
	$B \quad [\text{Kč} \cdot \text{břit}^{-1}]$	-	náklady na jeden břit VBD,
	$Q \quad [\text{ks}]$	-	počet kusů obrobeneých mezi výměnou nástroje.

$$Q = \frac{T}{\lambda \cdot t_{AS}} \quad [\text{ks}] \quad (4.6)$$

kde:	$T \quad [\text{min}]$	-	trvanlivost bříty nástroje,
	$\lambda \quad [-]$	-	poměr obráběné plochy k celkové délce strojního posuvu.

Pomocí výše uvedených hodnot byl sestaven graf, jenž znázorňuje změnu přímých nákladů na obrobek jednoho kusu v závislosti na vzrůstající trvanlivosti bříty nástroje (viz obr. 4.33).



Obr. 4.33 Závislost trvanlivosti bříty nástroje na přímých nákladech včetně konkrétních hodnot.

Z obr. 4.33 je patrné, že při nízké trvanlivosti bříty z PKNB přímé náklady na obrobek 1 kusu prudce rostou. V místech, kde trvanlivost T dosahuje hodnot přibližně 50 min, se začínají přímé náklady stabilizovat a nedochází k tak prudkým odchýlkám. Této hodnotě trvanlivosti odpovídají $A = 7 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$. Od hodnoty trvanlivosti $T = 250 \text{ min}$ a více se přímé náklady již mění velmi nepatrným způsobem. Pro trvanlivost $T = 250 \text{ min}$ jsou odpovídající přímé náklady $A = 4,1 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$. Z toho lze vyvodit doporučení, že pro zajištění co nejmenších hodnot přímých nákladů při dané hodinové sazbě stroje a ceně VBD je potřeba, aby trvanlivost nástroje z PKNB dosahovala hodnot alespoň přibližně okolo $T = 250 \text{ min}$.

ZÁVĚR

Diplomová práce na téma Obrábění kalených ocelí byla zaměřena na problematiku podélného soustružení oceli 14 109 v zakaleném stavu, která se používá pro výrobu valivých elementů ložisek, kde je kladen vysoký nárok zejména na kvalitu povrchu, s čímž jsou spojeny dokončovací operace obrábění. Pro tyto účely byl použit nástroj z PKNB, který svými vlastnostmi splňuje nároky kladené na dokončovací soustružení zakaleného materiálu. Mimo základních teoretických poznatků v oblasti obrábění kovů bylo cílem analyzovat vyměnitelnou břitovou destičku (VBD) z hlediska silového zatížení a výsledné jakosti povrchu na základě různých kombinací řezné rychlosti v_c , posuvu f a šířky záběru ostří a_p . Z dostupných výsledků byly poté zvoleny nejvhodnější kombinace řezných podmínek splňující kritéria minimálních hodnot složek silového zatížení a výsledné jakosti povrchu.

Experimentální testování probíhalo za následujících podmínek:

- Obráběcí stroj: univerzální hrotový soustruh SV 18 RD s plynulou regulací otáček,
- nástroj: PCLNL 2525 M 12, VBD CNGA 120408S01020B;TB310 (Dormer Pramet s. r. o.),
- podélné soustružení bylo provedeno bez použití procesní kapaliny.

Z experimentálního testování 12 ks vzorků s danými kombinacemi řezných podmínek vyplývá:

- Silové zatížení zaznamenalo stabilní průběh soustružení, jelikož vznikaly minimální odchylky v jednotlivých hodnotách silových složek během časového úseku měření,
- z uvedených řezných podmínek má největší vliv na změnu velikosti silových složek šířka záběru ostří a_p , především je zaznamenána vysoká změna u síly posuvové (F_f) a pasivní (F_p),
- při postupném zvyšování řezné rychlosti až na $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ dochází k poklesu řezné síly F_c za předpokladu srovnání stejných hodnot a_p a f (například porovnání vzorků 4,8 a 12),
- největší podíl na výslednici celkové řezné síly F má složka řezné síly F_c , nicméně během zvyšování hodnot parametrů a_p a f se na výsledné F významně podílela pasivní síla F_p , kdy u vzorku 12 ($v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,35 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm}$) nabývala totožných hodnot jako F_c ,
- nejnižší hodnota posuvové síly $F_f = 47,1 \text{ N}$ (vzorek 9) a nejvyšší $F_f = 128,3 \text{ N}$ (vzorek 8),
- nejnižší hodnota pasivní síly $F_p = 68,7 \text{ N}$ (vzorek 9) a nejvyšší $F_p = 197,4 \text{ N}$ (vzorek 12),
- nejnižší hodnota řezné síly $F_c = 145,3 \text{ N}$ (vzorek 9) a nejvyšší $F_c = 224,9 \text{ N}$ (vzorek 4),
- nejnižší hodnota celkové řezné síly $F = 145,3 \text{ N}$ (vzorek 9) a nejvyšší $F = 305,8 \text{ N}$ (vzorek 4),
- při měření jakosti povrchu u vzorků 5, 6, 9, 11 a 12 nebylo dosaženo průměrné hodnoty R_a vyšší než $0,30 \text{ } \mu\text{m}$, přičemž u 11 z 12 vzorků nebylo vyšších hodnot R_a než $0,40 \text{ } \mu\text{m}$,
- nejnižší průměrné hodnoty parametrů jakosti byly: $R_a = 0,23 \text{ } \mu\text{m}$ a $R_z = 1,43 \text{ } \mu\text{m}$ (vzorek 6) a nejvyšší průměrné hodnoty činily $R_a = 0,48 \text{ } \mu\text{m}$ a $R_z = 2,87 \text{ } \mu\text{m}$ (vzorek 8),
- nejkvalitnější jakost povrchu R_a a R_z byla dosažena při $v_c = 155 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a $f = 0,05 \text{ mm}$ bez ohledu na výši a_p (vzorky 5 a 6) a jelikož měl vzorek 9 srovnatelné hodnoty a zároveň nejnižší hodnoty všech složek sil, tak byl zvolen jako nejlepší varianta v experimentu, optimální řezné podmínky proto jsou následující: $v_c = 180 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$, $f = 0,05 \text{ mm}$,
- závěrem byly vypočteny přímé náklady na výrobu 1 ks pro zvolený nejvhodnější vzorek č. 9, z výsledků vyplývá, že přibližně od trvanlivosti břitu $T = 250 \text{ min}$ se náklady stabilizují okolo $A = 4,1 \text{ Kč} \cdot \text{ks}^{-1}$ a dále se již mění nepatrněji než při nižších hodnotách trvanlivosti T .

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. KOCMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Technologie obrábění*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 270 s. : il., tabulky, grafy, schémata. ISBN 80-214-3068-0.
2. KUDELA, Miroslav. SANDVIK COROMANT (FIRMA). *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997, 1 sv. (různé stránkování) : il. ISBN 91-972299-4-6.
3. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
4. KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 330 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-7204-722-2.
5. HUMÁR, Anton. *Technologie I: Technologie obrábění-1. část* [online]. *Studijní opory pro magisterskou formu studia*. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003, 138 s. [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
6. *DORMER PRAMET: Katalog pro školy - vybraný sortiment*. Prametheus. 2017. Dostupné také z: www.dormerpramet.com
7. *Katalogy a příručky společnosti SANDVIK Coromant: Soustružnická příručka* [online]. [cit. 2021-02-09]. Dostupné z: <https://cutt.ly/lkTD0mG>
8. *Příručka pro technology - Není teplota příliš vysoká nebo nízká? MM Průmyslové spektrum* [online]. 2012/05 [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prirucka-pro-technology-neni-teplota-prilis-vysoka-nebo-nizka.html>
9. NESLUŠAN, Miroslav. *Sústruženie kalených ocelí*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2009, 253 s. : il. ISBN 978-80-554-104-1.
10. *SANDVIK Coromant: Training Handbook. Metal cutting technology* [online]. [cit. 2021-02-10]. Dostupné z: <https://cutt.ly/VkTFD34>
11. TSCHÄTSCH, Heinz. *Applied machining technology*. Dordrecht: Springer, 2009, xvii, 398 s. : il. ; 24 x 16 cm. ISBN 978-3-642-01006-4.
12. *Soustružení: Základní soustružnické nože a jejich popis* [online]. [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://www.osu.cz/dokumenty/proportal/pdf/kpv/soustruzeni/lekce3.htm>
13. *Katalog a technický průvodce 2020.1 SECO Tools: Soustružení* [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/article/84585>

-
14. *SANDVIK Coromant: Volba vhodných soustružnických břitových destiček* [online]. [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/pages/how-to-choose-correct-turning-insert.aspx>
 15. BORO VAN, Petr. *Zvláštnosti třískového obrábění. Technický týdeník* [online]. 2006/01 [cit. 2021-02-19]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/zvlastnosti-triskoveho-obrabeni_18016.html
 16. *ISCAR: Inovace řezných materiálů* [online]. [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://www.iscar.cz/newarticles.aspx/countryid/6/newarticleid/4209>
 17. PÍŠKA, Miroslav a Katrin BUČKOVÁ. *Řezné materiály současnosti. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2018/5 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/rezne-materialy-soucasnosti.html>
 18. ČEP, Robert a Jana PETRŮ. *TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ V PŘÍKLADECH: Materiály řezných nástrojů* [online]. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2013 [cit. 2021-02-22]. ISBN 978-80-248-3014-8. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_003/Technologie%20obrabeni%20v%20p%C5%99%C3%ADkladech.pdf
 19. *TumliKOVO: Rychlořezné nástrojové oceli, jejich chemické složení a způsoby tepelného zpracování* [online]. 2011/1 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/nastrojovematerialy/rychlomezne-oceli-hss/>
 20. *ONEINDUSTRY: Rychlořezná ocel* [online]. 2019/7 [cit. 2021-02-23]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.one/lexikon/rychlomezna-ocel/>
 21. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008, 235 s. : il. (převážně barev.) ; 26 cm. ISBN 978-80-254-2250-2.
 22. BORO VAN, Petr. *Řezné nástroje: Slinuté karbidy. Technický týdeník* [online]. 2011/2 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/rezne-nastroje/rezne-nastroje-2_8514.html
 23. *SANDVIK Coromant: Nástrojové materiály* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
 24. SOUSA, Vitor F. C. a Francisco J. G. SILVA. *Recent Advances in Turning Processes Using Coated Tools—A Comprehensive Review* [online]. 2020 [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2075-4701/10/2/170/htm>
 25. *CERATIZIT GROUP: What is cemented carbide?* [online]. [cit. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.ceratizit.com/int/en/company/passion-for-cemented-carbide-/cemented-carbide.html>
-

-
26. *MITSUBISHI MATERIALS: Cermets* [online]. [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <http://carbide.mmc.co.jp/permanent/courses/91/cermets.html>
 27. BRYCHTA, Josef. *Progresivní metody v obrábění: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011. ISBN 978-80-248-2513-7.
 28. *CeramTec: Cermets for Machining Applications* [online]. [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: <https://www.ceramtec.com/spk-cutting-materials/cermets/>
 29. MATĚJKA, J. a J. ČESÁNEK. *Řezná keramika* [online]. Fakulta strojní, ZČU Plzeň [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: http://www.ateam.zcu.cz/download/Rezna-keramika-07_08.pdf
 30. MOHYLA, Miroslav a Petr MOHYLA. *Strojírenské materiály II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006. ISBN 80-248-1019-0.
 31. *TECHMAGAZÍN: Břítové destičky s vrstvou PCBN* [online]. 2017/6 [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/46332?poslat-emailem>
 32. *Superhard.cz: Superhard PKD a CBN katalog* [online]. [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <http://www.superhard.cz/ke-stazeni>
 33. *Rotana a.s.: Ultratvrdé nástroje* [online]. [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://www.rotana.cz/35-ultratvrde-nastroje.html>
 34. *TUNGALOY CORPORATION: Catalog Hard Turning* [online]. [cit. 2021-03-09]. Dostupné z: <https://tungaloy.com/themencode-pdf-viewer/?file=https://tungaloy.com/wpdata/wp-content/uploads/HardTurning.pdf>
 35. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. : il. ; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
 36. KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
 37. HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1. 1. díl, Nauka o materiálu*. 4. revidované vydání. Praha: Scientia, 2007, 266 stran : ilustrace. ISBN 978-80-86960-26-5.
 38. PILOUS, Václav. *Technologie kovových materiálů*. 2. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-699-8.
 39. HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1. 2. díl, Metalografie a tepelné zpracování*. 3., přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 173 s. : il. ; 21 cm. ISBN 80-7183-265-0.
 40. *Kurz tepelného zpracování: učební texty*. Praha: Ecosond, 2009. ISBN 978-80-904462-1-2.
-

41. MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *[Nauka o materiálu]: 1. část. Struktury kovových materiálů*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3379-1.
42. AZ PROKAL s. r. o.: *Druhy kalicích prostředků* [online]. [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://azprokal.cz/cs/prehled-sortimentu/chemicke-pripravky/kalici-oleje-a-polymery/teorie/>
43. *Změna mechanických vlastností při popouštění. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006/06 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zmena-mechanickych-vlastnosti-pri-popousteni.html>
44. ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 24 s. Třídící znak 014450.
45. *TumliKOVO: MANUÁL SOUSTRUHŮ SV18 RD A SV18 RB* [online]. [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/download/>
46. *DORMER PRAMET: General Catalogue DORMER 2019* [online]. [cit. 2021-4-26]. Dostupné z: <https://www.dormerpramet.com/downloads/2019%20general%20catalogue%20pramet%20set4%20cz-ru-pl-sk.pdf>
47. *KISTLER: Multicomponent Dynamometer Type 9257B* [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/files/document/000-151e.pdf>
48. SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. *Základy konstruování*. Vydání sedmé, přepracované a doplněné. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2019. ISBN 978-80-7623-009-5.
49. *TAYLOR HOBSON Surtronic řada S-100: Robustní a přenosné drsnoměry* [online]. [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: [https://imeco-th.cz/files/tinymce/Surtronic_S-100\(CZ\)_low.pdf](https://imeco-th.cz/files/tinymce/Surtronic_S-100(CZ)_low.pdf)

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Popis
A	[Kč·ks ⁻¹]	přímé náklady na obrobení 1 ks
A	[%]	tažnost
A _D	[mm ²]	jmenovitý průřez třísky
A' _α	[-]	vedlejší hřbet nástroje
A _α	[-]	hřbet nástroje
A _γ	[-]	čelo nástroje
B	[Kč·břit ⁻¹]	náklady na jeden břit VBD
C _{Fc} , C _{Ff} , C _{Fp}	[-]	materiálové konstanty
D	[mm]	průměr obrobku
E	[Kč·hod ⁻¹]	náklady na 1 hodinu provozu soustruhu
E _e	[J]	mechanická energie
F	[N]	celková řezná síla
F _c	[N]	řezná síla
F _f	[N]	posuvová síla
F _p	[N]	pasivní síla
P _c	[kW]	řezný výkon
P _f	[kW]	výkon potřebný pro posuv
Q	[J]	celkové množství tepla
Q	[ks]	počet kusů obrobených mezi výměnou nástroje
Q _f	[J]	teplo generované třením hřbetu nástroje a obrobené plochy
Q _n	[J]	teplo vedené do nástroje
Q _o	[J]	teplo vedené do obrobku
Q _p	[J]	teplo vedené do okolí (prostředí)
Q _t	[J]	teplo vedené do třísky
Q _{sh}	[J]	teplo generované deformací ve střižné rovině
Q _{tr}	[J]	teplo generované třením čela nástroje a třísky
R _a	[μm]	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
R _e	[MPa]	mez kluzu
R _m	[MPa]	pevnost v tahu
R _p	[μm]	výška nejvyššího výstupku profilu
R _v	[μm]	hloubka nejnižší prohlubně profilu
R _z	[μm]	největší výška profilu
S	[-]	nástrojové hlavní ostří
S'	[-]	nástrojové vedlejší ostří
T	[min]	trvanlivost břitu nástroje
Z	[%]	kontrakce
a _p	[mm]	šířka záběru ostří
b	[mm]	šířka třísky
f	[mm]	posuv na otáčku
h	[mm]	tloušťka třísky
i	[-]	počet průjezdů nástroje
k _c	[MPa]	měrná řezná síla
n	[min ⁻¹]	otáčky
r _ε	[°]	poloměr zaoblení špičky nástroje
t _{AS}	[min]	jednotkový strojní čas
v _c	[m·min ⁻¹]	řezná rychlost

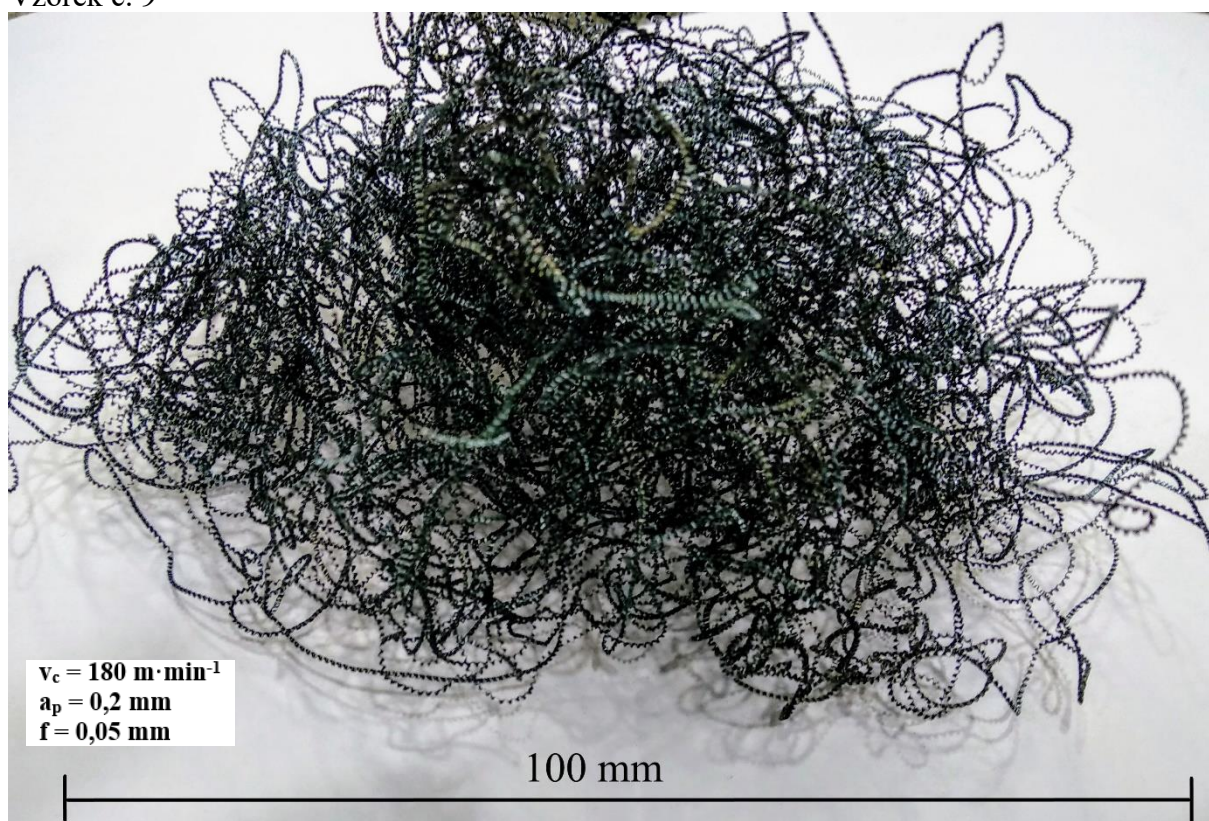
V_e	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	výsledná efektivní rychlost
V_f	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$	posuvová rychlost
X_{Fc}, X_{Ff}, X_{Fp}	[-]	exponenty vlivu šířky záběru ostří
Y_{Fc}, Y_{Ff}, Y_{Fp}	[-]	exponenty vlivu posuvu
α_o	$[\circ]$	nástrojový ortogonální úhel hřbetu
β_o	$[\circ]$	nástrojový ortogonální úhel břitu
γ_o	$[\circ]$	nástrojový ortogonální úhel čela
ε_r	$[\circ]$	nástrojový úhel špičky
κ_r	$[\circ]$	nástrojový úhel nastavení hlavního ostří
κ'_r	$[\circ]$	nástrojový úhel nastavení vedlejšího ostří
λ	[-]	poměr obráběné plochy k celkové délce strojního posuvu
λ_s	$[\circ]$	nástrojový úhel sklonu hlavního ostří

Zkratka	Jednotka	Popis
CBN/KBN		cubic boron nitride / kubický nitrid boru
CNC		computer numerical control
CVD		chemical vapor deposition
HB		Brinell hardness; tvrdost dle Brinella
HRC		Rockwell hardness C; tvrdost dle Rockwella
HSS		high speed steel; rychlořezná ocel
PCBN/PKBN		polykrystalický kubický nitrid boru
PKD		polykrystalický diamant
PVD		physical vapor deposition
VBD		vyměnitelná břitová destička

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Fotografie třísek realizovaných během soustružení kalené oceli 14 109

Vzorek č. 9



Vzorek č. 10

